

wakacyjny
łatwy i przyjemny

KURS AUDIO

Słuchaj – zwrócił się do mnie naczelny EP – nie spotkałem jeszcze elektronika, który by nie „popętnił” choć raz w życiu wzmacniacza audio. To najpiękniejszy dział elektroniki, pobudzający intelekt, ale również emocje, a nawet duszę. Tak, tak, jest przecież jakiś pierwiastek mistycyzmu i wiary w zakupie kabli za 10.000 zł. A co powiedzieć o wyższości lampy nad tranzystorem? Sierpień, plaża to idealny czas i miejsce żeby sobie uzupełnić i uporządkować wiedzę w tej dziedzinie. Napisz prosto, zrozumiale, ale nie bałamutnie o tych sprawach.

Z przyjemnością przyjąłem to zadanie i tak właśnie powstał ten KURS AUDIO.

Miał to być kurs wakacyjny do opublikowania w całości w sierpniowym wydaniu EP. Jednak ze względu na znaczną objętość trzeba było cały materiał podzielić na dwie części. Tak z sierpniowego kursu wakacyjnego zrobił się sierpniowo-wrzesniowy kurs letni. Pierwsza część zawiera całą wiedzę o wzmacniaczach. W części drugiej (EP9/2008) dotknijmy zagadnień z pogranicza mitologii audio, typu „odwiecznego” sporu lampa czy tranzystor, kabli w cenie wakacji w Acapulco oraz kuglarstwa wokół parametrów wzmacniaczy. Zaczynamy.

Wzmacniacze

klasy A do Z, a nawet jeszcze dalej...

Wszystko o klasach wzmacniaczy

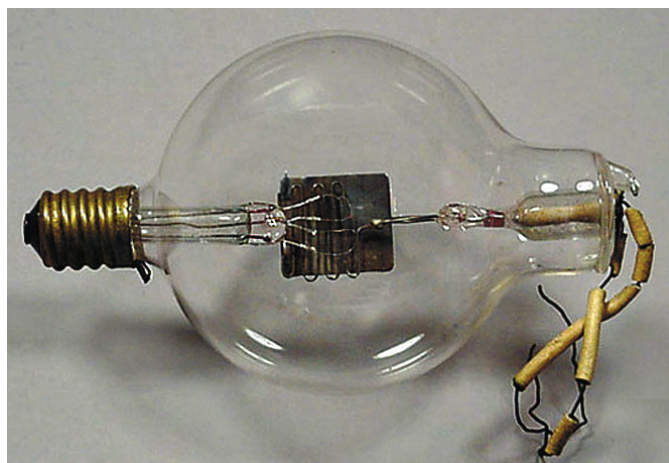
Na początek warto zaznaczyć, że jeśli w ramach tego artykułu mówimy o wzmacniaczach różnych klas, to generalnie mamy na uwadze **wzmacniacze mocy audio**. Ale kwestia klas dotyczy także innego rodzaju wzmacniaczy, na przykład wzmacniaczy wysokiej częstotliwości, stosowanych w technice radiowej i telewizyjnej, co zresztą jest czasem źródłem nieporozumień.

Od razu też trzeba zaznaczyć, że tylko niektóre klasy wzmacniaczy są popularne i godne wnikliwszej analizy. I tak na przykład mamy wzmacniacze klasy A, klasy D, a przede wszystkim klasy AB, natomiast niektóre klasy w istocie nie zasługują na swoją nazwę. Są co najwyżej „klasami marketingowymi”, częstokroć opatentowanymi i chronionymi przez jednego tylko wytwórcę. Przykładami są choćby klasa I czy klasa T. Jeszcze inne są tylko propozycjami, które zostały opisane, a niektóre opatentowane, ale nie znalazły praktycznego zastosowania. Przykładami mogą być klasy K czy KB.

Żeby dobrze zrozumieć sprawę klas wzmacniaczy, warto sięgnąć do historii elektroniki.

Troszkę historii

Wynalezienie w roku 1906 lampy wzmacniającej, triody, nie zapoczątkowało natychmiastowego gwałtownego rozwoju wzmacniaczy audio. Po pierwsze, pierwotnie audion, nazwany później triodą, nie miał służyć do wzmacniania sygnałów, tylko przeznaczony był do odbiorników radiowych jako czulszy od diody detektor odebranych sygnałów. Po drugie, trzeba było dopracować wynalazek, i z prototypu (fot. 1) uczynić produkt rynkowy. I tu od razu trzeba dodać: drogi i kłopotliwy produkt. Kłopotliwy choćby z uwagi na wymagane wysokie napięcia zasilania i duże zużycie energii. Po trzecie, niekorzystny dla rozwoju wzmacniaczy audio był wybuch pierwszej wojny światowej, podczas której wysiłki Europy, a także Ameryki skierowany był na kwestie militarne. Dopiero w latach 20. XX wieku zaczęła się złota epoka radia, ale należy pamiętać, że pierwsze radia były słuchawkowymi odbiornikami detektorowymi i nie zawierały żadnych elementów wzmacniających. Czyli dopiero w latach dwudziestych, a właściwie w drugiej ich połowie, lampa elektronowa stała się powszechnie dostępnym produktem rynkowym. Wcześniej, począwszy od roku 1912, kosztowne i kłopotliwe lampy były stosowane w celach profesjonalnych, na przykład jako generatory oraz jako wzmacniacze w długich liniach telefonicznych i układach nadawczych. Dopiero w drugiej połowie lat dwudziestych ubiegłego stulecia w domach pojawiły się radia zawierające lampy. Początkowo bardzo ograniczone było także wykorzystanie lamp we wzmacniaczach przeznaczonych do nagłośnienia. Przyczyną były nie tylko kłopoty z zasilaniem – tu należy przypomnieć, że nie bez związku z problemem powszechnej elektryfikacji, zarówno napięcie żarzenia, jak i wysokie napięcie anodowe pierwszych wzmacniaczy lampowych i radiodiodów pochodziło z zestawu akumulatorów lub baterii jednorazowych. Stopniowo jednak upowszechniały się radia i gramofony ze wzmacniaczami.

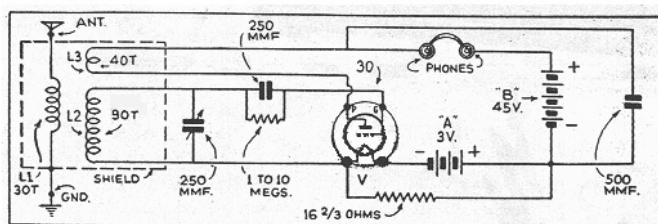


Fot. 1.



Single Ended vs Push-Pull

Poważnym ograniczeniem w pierwszych wzmacniaczach audio była niewielka moc wyjściowa. Ta mała moc wyjściowa wynikała z budowy stopnia wyjściowego. Mianowicie pierwsze wzmacniacze, a właściwie odbiorniki audio, zawierały w stopniu końcowym jedną lampę elektronową, a schemat zrealizowany był według idei pokazanej na rys. 2. Trioda pełniła jednocześnie rolę detektora i wzmacniacza. Obciążeniem były słuchawki, a potem zupełnie już dziś niespotykane wysokoomowe głośniki o oporności 2000 Ω . Głośnik taki jest pokazany na fot. 3, pochodzący ze strony: www.vintageradio.nl/Menu/luidsprekers.htm



Rys. 2.

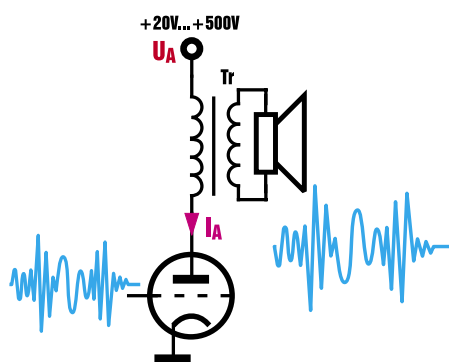


Fot. 3.

stosowanych niskoomowych głośników dynamicznych. Po drugie, obecność transformatora powodowała, że przez głośnik nie płynął prąd stały.

To, że na głośniku występują wzmocnione przebiegi zmienne, jest oczywiste. Co jednak bardzo ważne, przez lampę i uzwojenie pierwotne transformatora z rys. 4 musiał przepływać znaczny spoczynkowy prąd stały. Sygnał audio modulował ten prąd spoczynkowy – przykładowy, nieco idealizowany przebieg prądu anodowego lampy pokazany jest na rys. 5.

Z początku za sukces uważano uzyskanie mocy wyjściowej rzędu kilku dziesięciu czy kilkuset miliwatów. Z czasem pojawiło się zapotrzebowanie na wzmacniacze o większej mocy wyjściowej. Nietrudno się domyślić, że aby zwiększyć moc wyjściową, należało stosować lepsze lampy, pracujące przy większym prądzie spoczynkowym i wyższym napięciu anodowym.



Rys. 4.

Należy pamiętać, że prądy anodowe w lampach są małe, rzędu kilku, kilkunastu, czy kilkudziesięciu miliamperów, a napięcia anodowe i zasilania – duże, rzędu stu czy dwustu woltów i w takich wzmacniaczach trzeba było stosować specjalne głośniki o dużej oporności. Znacznie lepsze okazało się zastosowanie głośnika o małej oporności, współpracującego z transformatorem według idei z rys. 4. Transformator pełnił tu bardzo ważną rolę. Po pierwsze, zgodnie ze swą nazwą transformował impedancję i pozwalał na wykorzystanie powszechnie dziś

Pomijając trudności technologiczne, zwiększanie prądu i napięcia pracy powodowało zwiększenie mocy strat w lampie ($P_{str} = U_a \cdot I_a$). Problemem było nie tylko większe zużycie energii, ale też trudności z budową lamp dużej mocy o dobrych parametrach. W tej sytuacji

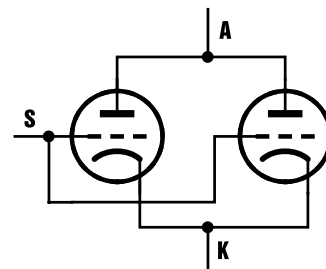
lepszym rozwiązaniem było zastosowanie kilku lamp i połączenie ich, powiedzmy, równolegle.

Ale przy idei według rys. 4, przy równoległym połączeniu kilku lamp, pozostaje poważny problem zużycia energii i sprawności. Otóż w tej prostej koncepcji przebieg zmienny występuje na tle stałych napięć i prądów spoczynkowych. Moc

wyjściowa przebiegów zmiennych jest ograniczona właśnie wartością prądów spoczynkowych i napięcia zasilającego, na co wskazują rys. 4 i 5. Maksymalna niezniekształcona amplituda prądu przebiegu zmiennego jest równa co najwyżej wartości prądu spoczynkowego, a w szczytach występowania prąd zwiększa się do wartości dwa razy większej od prądu spoczynkowego. Nieco podobnie (tylko niejako odwrotnie) jest z napięciem. Nietrudno się domyślić lub policzyć, że maksymalna moc wyjściowa oddawana do głośnika jest znacznie mniejsza, niż moc pobierana ze źródła zasilania, a to oznacza, że sprawność energetyczna jest mała. Co gorsze, niezmienny, duży prąd spoczynkowy oznacza, że pracujący wzmacniacz stale pobiera tę samą dużą moc, niezależnie od mocy oddawanej do głośnika. Także przy brakuysterowania wzmacniacz pobiera ze źródła zasilania dużą moc i zamienia ją na bezużyteczne ciepło. Jest to niewątpliwie duża wada tego rodzaju wzmacniaczy.

Już tu moglibyśmy stwierdzić, że właśnie omawiamy prosty przykład realizacji wzmacniacza klasy A, ale poświęćmy jeszcze troszkę czasu na przypomnienie historii, żeby zobaczyć nieco szerszy obraz zagadnienia.

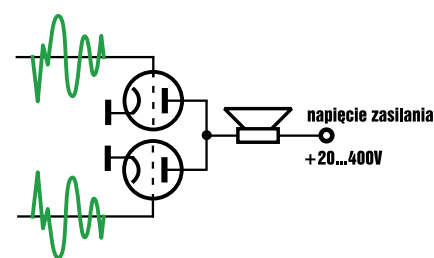
Pomysł „zwykłego” równoległego połączenia lamp pokazany w uproszczeniu na rys. 6, daje niewielkie korzyści. Jednak genialnym rozwiązaniem okazuje się zastosowanie dwóch połączonych równolegle lamp, ale nieco inaczej sterowanych. Sterowanie dwóch lamp przebiegami „odwrotnymi” nie tylko pozwala uzyskać większą moc, ale też otwiera niezmiernie cenne możliwości. Na rys. 7 przedstawiono podstawową ideę. Na pierwszy rzut oka może to nawet wyglądać dziwnie, a nawet budzić wątpliwości, ale okazuje się, że właśnie takie rozwiązanie pozwala zrealizować bardzo interesującą ideę: jedna lampka ma wzmacniać tylko dodatnie



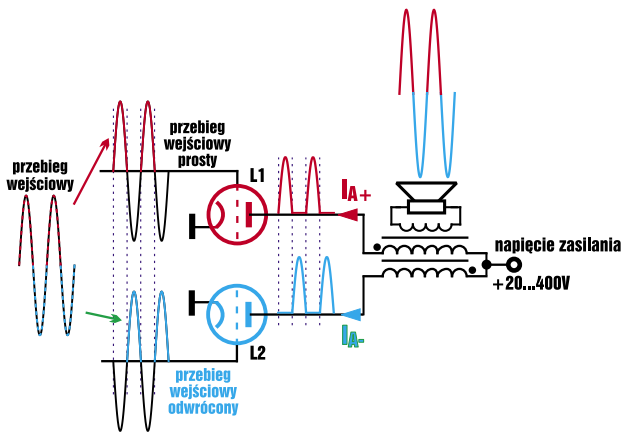
Rys. 6.

połówki przebiegu wyjściowego, druga – tylko ujemne. Ilustruje to rys. 8. Taka koncepcja ma istotne zalety, ponieważ polega na tym, żeby w spoczynku przez lampy w ogóle nie płynął prąd. Pojawienie się dodatniej połówki sygnału ma powodować przepływ prądu tylko przez „czerwoną” lampę L1, natomiast ujemne połówki sygnału po „odwróceniu” mają powodować przepływ prądu przez „zieloną” lampę L2. Trzyczwojennowy transformator wyjściowy prawidłowo sumuje prądy obu lamp dzięki odpowiedniemu połączeniu uzwojeń. Prąd płynący przez lampy ma wyglądać jak na rys. 9.

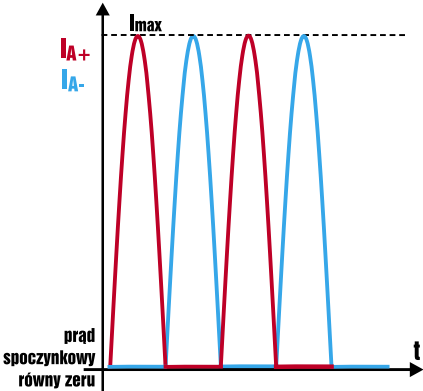
I tu możemy powiedzieć, że oto na rys. 8 i 9 mamy ideę wzmacniacza klasy B:



Rys. 7.



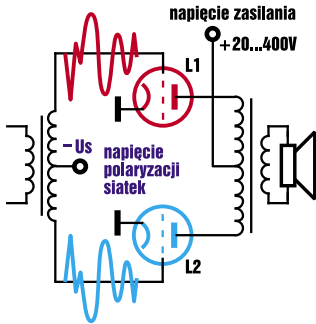
Rys. 8.



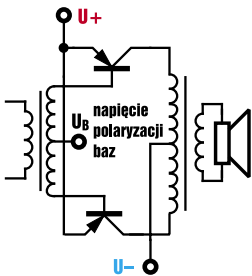
Rys. 9.

ma dużo lepszą sprawność energetyczną od wspomnianych wzmacniaczy klasy A, ponieważ w spoczynku, bez sygnału wejściowego, przez lampy nie płynie prąd i nie wydzielają się w nich wtedy moc strat.

Wbrew pozorom, realizacja takiej koncepcji, sięgającej roku 1913 (Alexanderson), nie jest trudna. Wystarczą do tego dwie lampy o jednakowych charakterystykach i dwa transformatory z podwójnymi, odpowiednio połączonymi uzwojeniami (rys. 10). Transformator wejściowy ma dwa jednakowe uzwojenia wtórne, które dostarczają dwa przebiegi o jednakowej wielkości. Jeden z przebiegów jest „normalny”, drugi „odwrócony”. We wzmacniaczu czystej klasy B w spoczynku prąd przez lampy nie płynie (rys. 9) – punkt pracy lamp jest ustawiony na progu przewodzenia przez odpowiednio dobrane napięcie polaryzujące siatki. Dodatkowo połówki „normalnego” przebiegu otwierają „czerwoną” lampę L1, natomiast dodatnie połówki sygnału „odwróconego” (które są ujemnymi połówkami przebiegu wejściowego) otwierają „zieloną” lampę L2. Prądy anodowe dwóch lamp są sumowane w transformatorze wyjściowym i na głośniku występuje wzmacniony sygnał wejściowy.

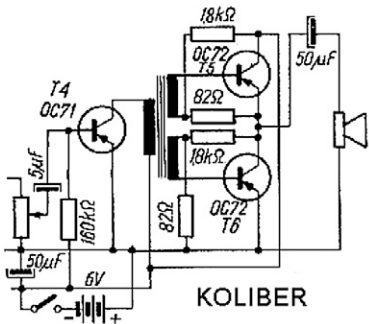


Rys. 10.



Rys. 11.

W literaturze angielskojęzycznej taki sposób pracy nazywany jest *push-pull* (pchaj – ciągnij). My zazwyczaj mówimy o *wzmacniaczu przeciwobnym* lub o *przeciwobnym stopniu wyjściowym wzmacniacza*. Inne odmiany wzmacniaczy

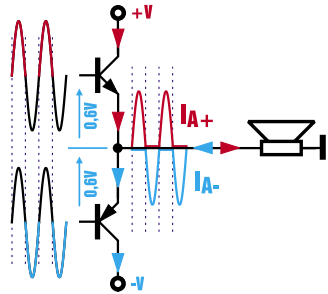


Rys. 12.

sobie pierwsze radioodbiorniki tranzystorowe, choćby krajowego Kolibra, w którym jednak zastosowane było nieco inne, pokrewne rozwiązanie układowe – patrz rys. 12. Przez szereg lat we wzmacniaczach mniejszej i większej mocy stosowano jedynie tranzystory germanowe, a te były typu PNP (np. TG50, OC70, TG70).

Kolejnym ważnym krokiem było upowszechnienie się tranzystorów krzemowych. Po pierwsze, miały one lepsze parametry od germanowych, a po drugie dostępne były pary komplementarnych tranzystorów PNP/NPN. Komplementarne tranzystory średniej i dużej mocy pozwoliły genialnie uprościć wzmacniacze mocy, a mianowicie całkowicie zrezygnować z ciężkich i kosztownych transformatorów i pracować przy niższych napięciach zasilania.

Podstawowa koncepcja beztransformatorowego wzmacniacza przeciwobnego na tranzystorach komplementarnych pokazana jest na rys. 13. Nadal jest to wzmacniacz przeciwobny *push-pull*. Patrząc z innej strony, można powiedzieć, iż jest to symetryczny wtórnik, czyli złożenie dwóch wtórników emiterowych (OC), pracujących na wspólne obciążenie.

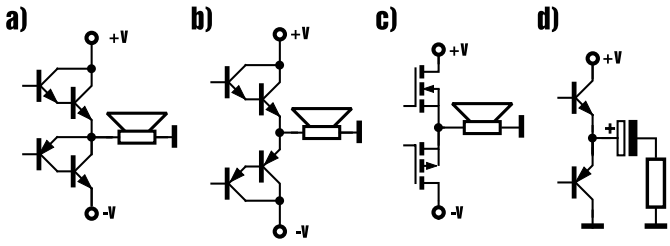


Rys. 13.

Zwróćmy uwagę, że w tym przypadku sygnały podawane na bazy obu tranzystorów nie są odwrócone. Są jednakowe, tylko przesunięte o napięcia otwierania tranzystorów (U_{BE} , około 0,6 V). Tutaj w przypadku zasilania napięciem symetrycznym nie potrzeba ani transformatora wejściowego, dostarczającego dwóch przebiegów o odwróconych fazach, ani transformatora wyjściowego, ponieważ sumowanie prądów obu tranzystorów następuje wprost na obciążeniu – głośniku.

Należy wyraźnie podkreślić, że dzięki zastosowaniu tranzystorów komplementarnych można było zachować ideę wzmacniacza przeciwobnego z rys. 7...11, tylko jest ona realizowana znacznie prościej i taniej.

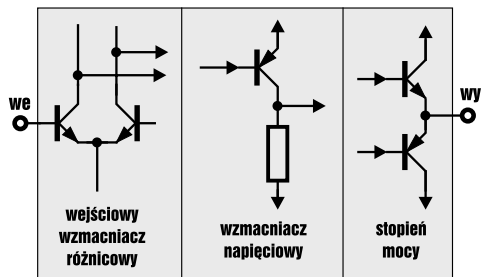
W miejsce pojedynczych tranzystorów bipolarnych można stosować układy Darlingtona oraz komplementarne tranzystory polowe MOSFET (rys. 14), a nawet tranzystory IGBT. Na rys. 14a pokazano stare rozwiązanie, stosowane chętnie w czasach, gdy trudno było o dobre tranzystory PNP dużej mocy. Stosowano sterujące tranzystory komplementarne, a wszystkie główne tranzystory dużej mocy były typu NPN. Tu starsi Czy-



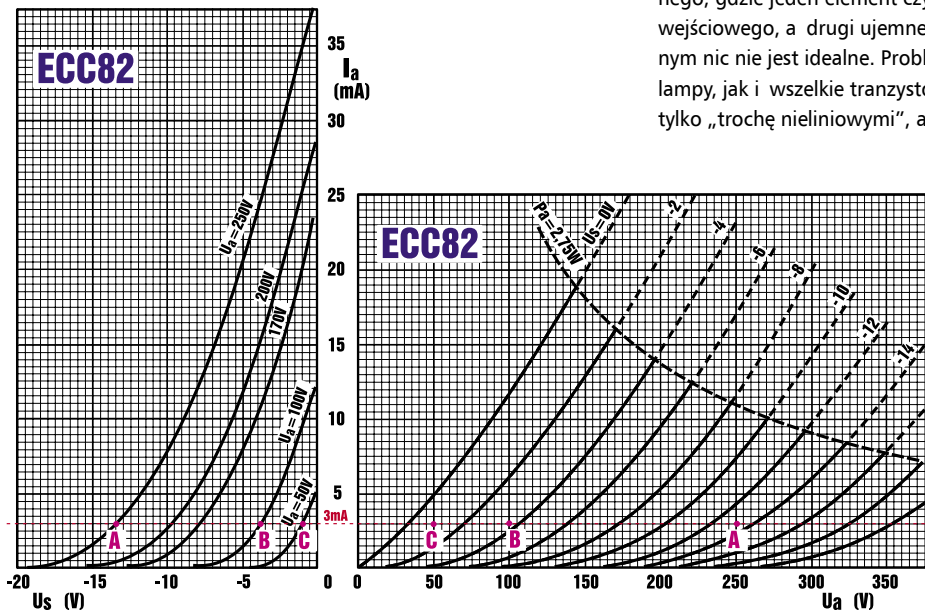
Rys. 14.

„pojedynczych”, jak na rys. 3 i 4, nazywane są *single ended*.

Prostą i znakomitą ideę wzmacniacza przeciwobnego (*push-pull*) można też zrealizować za pomocą tranzystorów. Klasyczny przykład pokazany jest na rys. 11, gdzie nieprzypadkowo występują tranzystory typu PNP. I tu starsi Czytelnicy z leżką w oku przypomną



Rys. 15.



Rys. 16.

telnicy z sentymentem przypomną sobie kultowe tranzystory 2N3055 o mocy strat ponad 100 W (z radiatorem).

Oprócz wersji z symetrycznym, podwójnym zasilaniem, można też zrealizować wersje z pojedynczym napięciem zasilania. Wtedy w spoczynku, w punkcie połączenia emiterów występuje spoczynkowe napięcie stałe o wartości połowy napięcia zasilania. Aby zapobiec przepływowi prądu stałego przez głośnik, na wyjściu umieszczony jest duży kondensator elektrolityczny.

Ogromna większość dzisiejszych wzmacniaczy mocy wykorzystuje koncepcje z rys. 13 i 14.

Dzisiejsze wzmacniacze mocy audio zazwyczaj są wzmacniaczami trzy-stopniowymi, budowanymi według uproszczonego schematu blokowego z rys. 15. Dwa pierwsze stopnie zapewniają niezbędne wzmocnienie napięciowe, natomiast głównym zadaniem przeciwzobojętkowego stopnia

mocy jest dostarczenie do obciążenia (głośnika) odpowiedniego prądu i tym samym mocy. Dlatego w klasycznych wzmacniaczach tranzystorowych z reguły stopień wyjściowy nie wzmacnia już napięcia, tylko jest wzmacniaczem prądu (symetrycznym wtórnikiem emiterowym). Do tego zagadnienia jeszcze wrócimy, a na razie spróbujemy zamknąć temat „kanonicznych” klas A, B, C. Zanim to zrobimy, powinniśmy na chwilę zająć się kwestią nieliniowości.

Nieliniowość

Przedstawiona wcześniej podstawowa idea wzmacniacza przeciwzobojętkowego, gdzie jeden element czynny wzmacnia dodatnie połówki sygnału wejściowego, a drugi ujemne, jest znakomita. Niestety, w świecie realnym nic nie jest idealne. Problem w tym, że elementy czynne, zarówno lampy, jak i wszelkie tranzystory, są elementami nieliniowymi. I to nie tylko „trochę nieliniowymi”, ale „bardzo nieliniowymi”. Pokazują to choćby

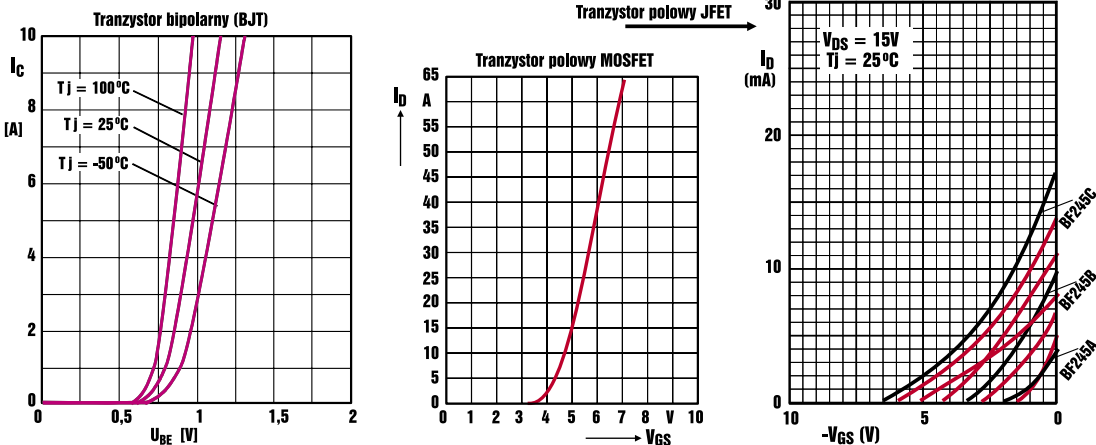
ich charakterystyki przejściowe. Rozważmy zagadnienie właśnie na przykładzie lamp, ponieważ opisywane tu problemy stanęły już przed konstruktorami wzmacniaczy sprzed kilkudziesięciu lat. Warto też o nich wiedzieć dziś, gdy wróciła moda na wzmacniacze lampowe.

Na rys. 16 pokazane są charakterystyki przejściowe i wyjściowe popularnej lampy elektronowej (triody). W przypadku tetrod i pentod charakterystyki są troszkę lepsze, ale problem nieliniowości charakterystyki przejściowej pozostaje. Charakterystyki większości tranzystorów przebiegają inaczej, niż triody, ale też wszystkie są silnie nieliniowe. Na

rys. 17 pokazano charakterystyki przejściowe tranzystora bipolarnego NPN, MOSFET-a N oraz JFET-a N. Nie ma chyba wątpliwości, że jeśli nieliniowy element będzie wzmacniał sygnał, to przebieg wyjściowy nie będzie wiernym odzwierciedleniem wejściowego. Będzie w większym lub mniejszym stopniu zniekształcony. Zilustrowano to w uproszczeniu na rys. 18. Z lewej strony rysunku pokazana jest hipotetyczna sytuacja z lampą o idealnie liniowej charakterystyce. Takich lamp nie ma. Na rys. 18b pokazana jest sytuacja z rzeczywistą lampą, dotycząca m.in. wzmacniacza z rys. 4.

W przypadku, gdy pracujemy z małymi sygnałami, możemy tak dobrać warunki pracy elementu, żeby pracować na w miarę liniowym fragmencie charakterystyki (rys. 19). Na rysunku tym pokazano możliwości wyboru jednego z kilku odcinków w przybliżeniu liniowych we wzmacniaczu lampowym. Taka praca na w miarę liniowym odcinku

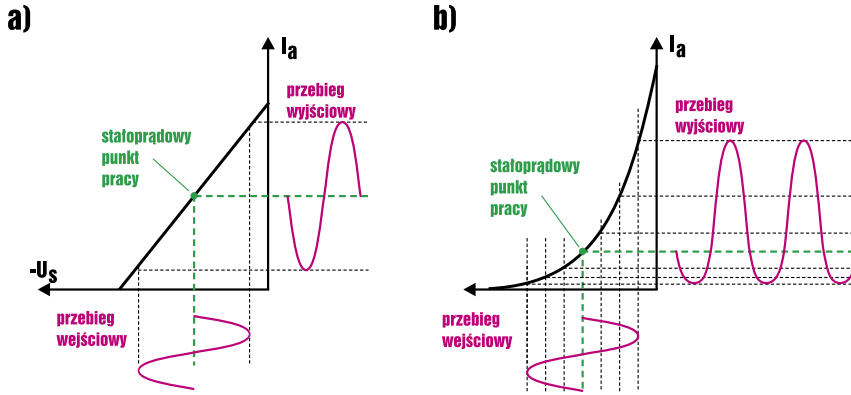
charakterystyki nie rozwiązuje jednak problemu do końca. Uzyskana linio-wość nadal jest daleka od ideału i niechybnie wystąpią zauważalne zniekształcenia. Czym większy sygnał, tym większe będą zniekształcenia. Czym mniejszy sygnał, tym zniekształcenia będą mniejsze. Niestety, we wzmacniaczach mocy kluczowym zagadnieniem jest moc wyjściowa i koniecznie trzeba pracować z możliwie



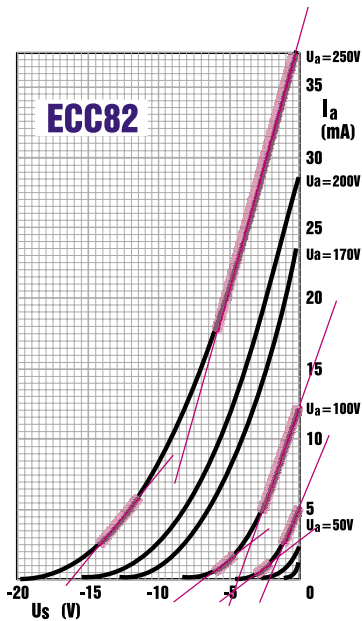
Rys. 17.

Uwaga! Błędny pogląd!

Niektórzy błędnie sądzą, że wzmacniacze klasy A muszą być realizowane na elementach dyskretnych, a nie na układach scalonych. Faktem jest, że przeważająca większość wzmacniaczy scalonych jest klasy AB i że w praktyce nie spotyka się scalonych wzmacniaczy klasy A. Jednak jak najbardziej możliwe jest zrealizowanie wzmacniacza scalonego klasy A.



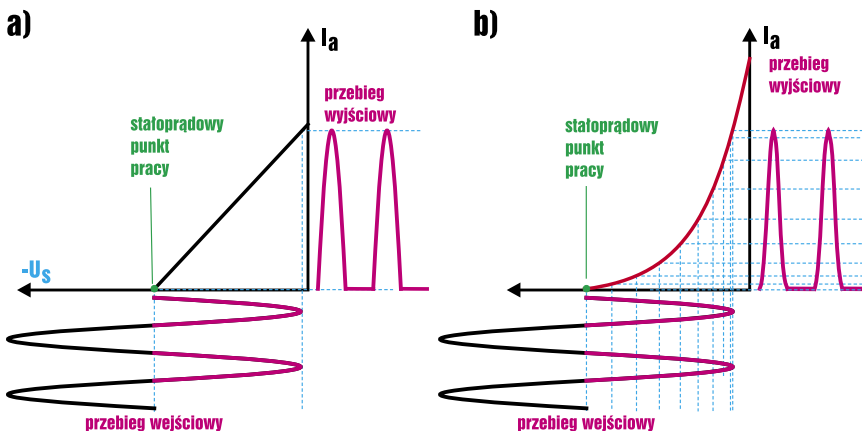
Rys. 18.



Rys. 19.

połówek na pewno zaowocuje nieakceptowalnie dużymi zniekształceniami (rys. 21).

Powtórzmy jeszcze raz, bo jest to bardzo ważne: przy małych sygnałach (np. w przedwzmacniaczach) zniekształcenia można minimalizować przez pracę na małej, prawie liniowej części charakterystyki. Niestety, we wzmacniaczach mocy praktycznie nie jest to możliwe, ponieważ trzeba pracować przy dużych sygnałach, na całej wykrzywionej charakterystyce. Nie oznacza to jednak, że sytuacja jest beznadziejna. Otóż po pierwsze, zniekształcenia można minimalizować przez wykorzystanie ujemnego sprzężenia zwrotnego, ale ujemne sprzężenie zwrotne nie jest uniwersalnym lekarstwem na wszystko i nie zawsze można w pełni wykorzystać



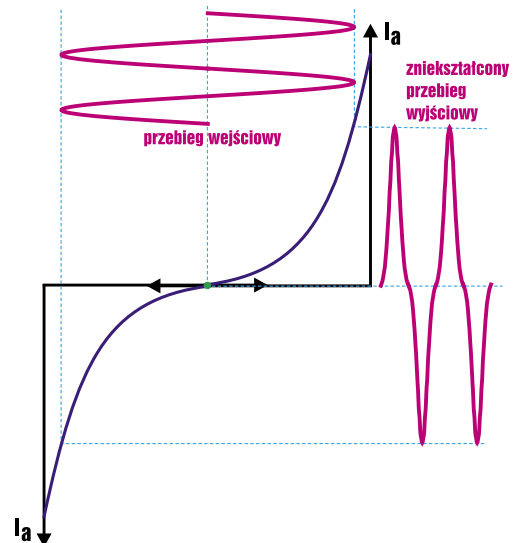
Rys. 20.

największymi sygnałami, a to oznacza konieczność pracy na całym zakresie nieliniowej charakterystyki.

Wprowadzcie we wzmacniacz przeciwobny z rys. 10 sytuacja jest nieco inna, niemniej też jaskrawo ujawnia się nieliniowość lamp i tranzystorów. Na rys. 20a pokazano, jak to wyglądałoby w przypadku lampy elektronowej o idealnie liniowej charakterystyce – porównajmy z rys. 18a. W takim teoretycznym, idealnym przypadku nie ma problemu. Niestety, charakterystyki rzeczywistych lamp i tranzystorów nie są liniowe. Problem jest zilustrowany na rys. 20b. Złożenie dwóch tak pokrzywionych

A, AB, B, C

Powróćmy do klasycznego wzmacniacza lampowego z rys. 10 z dwiema identycznymi lampami. Przypomnijmy: w idealizowanym wzmacniaczu czystej klasy B, w spoczynku przez lampy (tranzystory) stopnia wyjściowego w ogóle nie płynie prąd, natomiast nawet mały sygnał powoduje otwarcie jednej z lamp (tranzystorów). Lampy (tranzystory)



Rys. 21.

otwierają się na przemian – w klasie B nigdy nie płynie prąd przez oba te elementy, a co najwyżej przez jeden z nich.

Ten sam wzmacniacz przeciwobny z rys. 10 może też pracować w klasie A. We wzmacniaczu klasy A prąd anodowy nigdy nie spada do zera. W spoczynku, przez obie lampy będzie płynął duży prąd, a sygnał wejściowy będzie modulował prąd anodowy, jak to pokazano na rys. 5, a ściślej 18b.

Podkreślam, że ten sam układ wzmacniacza przeciwobnego może być wzmacniaczem klasy B lub klasy A, i nie tylko... Wszystko zależy od warunków pracy lamp (tranzystorów) stopnia końcowego, a warunki te można bardzo łatwo zmieniać, na przykład za pomocą jednego potencjometru włączonego według rys. 22. Jeśli suwak potencjometru będzie ustawiony w punkcie oznaczonym A, na siatki zostanie podane niewielkie ujemne napięcie i przez lampy będzie płynął duży prąd spoczynkowy. Jeśli ustawimy punkt pracy na środku charakterystyki, wtedy niewątpliwie uzyskamy wzmacniacz klasy A.

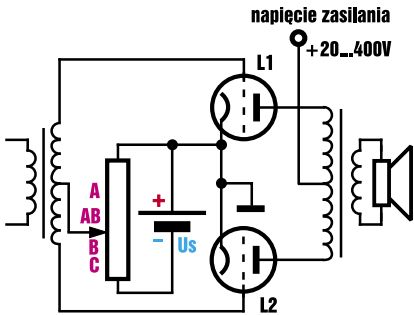
Ustawienie potencjometru w punkcie B spowoduje, że przez obie lampy nie będzie płynął prąd, ale

Uwaga! Błędny pogląd!

Niektórzy błędnie sądzą, że tranzystory we wzmacniaczach klasy A pracują przy niezmienniej wartości prądu i właśnie to gwarantuje znakomitą liniowość. Wyobrażenie to jest całkowicie błędne – we wzmacniaczach klasy A prąd tranzystorów zmienia się podczas pracy w szerokich granicach.

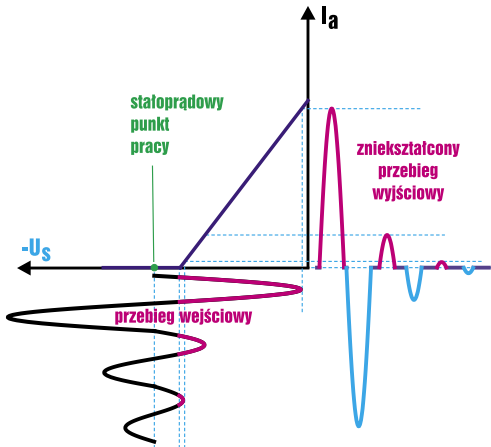
będą one na progu przewodzenia, i że nawet niewielki sygnał zmieniły będzie je na przemian otwierał. Otrzymamy wzmacniacz klasy B.

Podanie na siatkę jeszcze bardziej ujemnego napięcia polaryzacji przez ustawienie suwaka w punkcie C spowoduje, że obie lampy zostaną zatkane i małe sygnały nie będą ich otwierać. Dopiero większe sygnały spowodują przewodzenie lamp. Otrzymamy wtedy wzmacniacz klasy C, przez który małe sygnały w ogóle nie przejdą, a te większe zostaną silnie zniekształcone w okolicach przejścia przebiegu przez zero. Na rys. 23 pokazany jest przebieg wyjściowy idealizowanego wzmacniacza klasy C (o liniowej charakterystyce lamp, jak na rys. 18a, przy czym niebieskim kolorem zaznaczone są fragmenty ujemne, przechodzące przez drugą lampę wzmacniacza przeciwsobnego). Jak widać, małe sygnały w ogóle nie przejdą przez wzmacniacz, a większe zostaną zniekształcone. Tego rodzaju zniekształcenia nazywamy skrótnymi. Z uwagi na tak dużą deformację sygnału, wzmacniacze mocy audio nie pracują w klasie C. W praktyce wzmacniacze audio nie pracują też w czystej klasie B. Zazwyczaj pracują w tak zwanej klasie AB, co odpowiada ustawieniu suwaka potencjometru gdzieś pomiędzy punktami A i B. Wtedy w spoczynku przez lampy płynie jakiś niezerowy prąd. Zależnie od wielkości tego prądu mówimy o płytszej lub głębszej klasie AB. Można powiedzieć w uproszczeniu, że przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje w klasie A, bo stale przewodzą obie lampy.



Rys. 22.

wzmacniacze audio nie pracują też w czystej klasie B. Zazwyczaj pracują w tak zwanej klasie AB, co odpowiada ustawieniu suwaka potencjometru gdzieś pomiędzy punktami A i B. Wtedy w spoczynku przez lampy płynie jakiś niezerowy prąd. Zależnie od wielkości tego prądu mówimy o płytszej lub głębszej klasie AB. Można powiedzieć w uproszczeniu, że przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje w klasie A, bo stale przewodzą obie lampy.



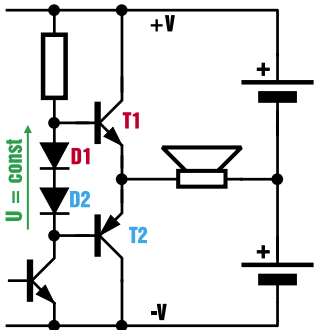
Rys. 23.

py. Natomiast przy dużych sygnałach układ zachowuje się jak wzmacniacz klasy B – przewodzi tylko jedna z lamp (tranzystorów).

Jeszcze o klasach A, B, C

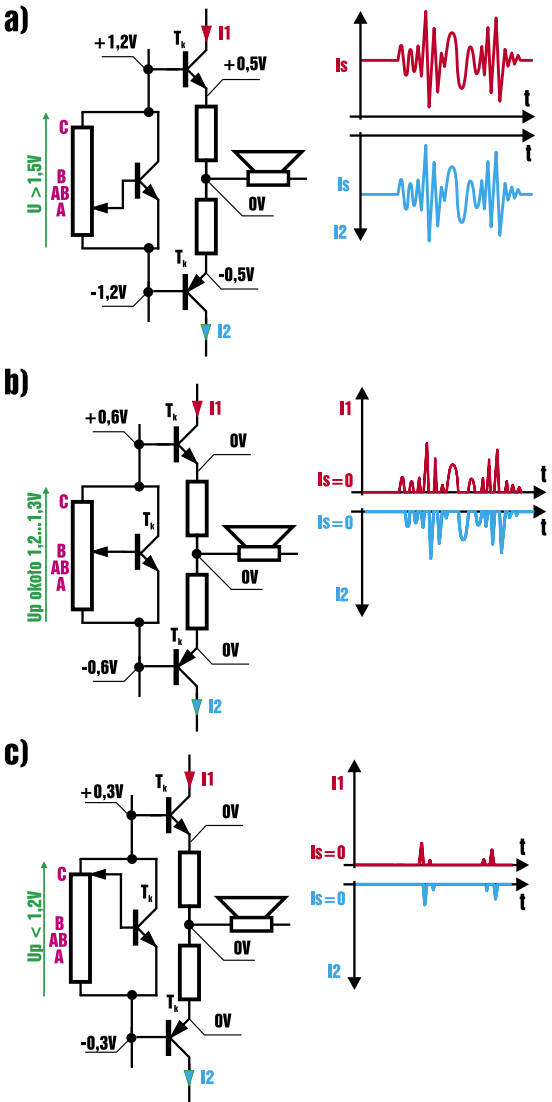
A jak we wzmacniaczach tranzystorowych można zmieniać klasę wzmacniacza przez zmianę prądu spoczynkowego? Okazuje się to równie łatwe, jak we wzmacniaczach lampowych. Zaczniemy od rys. 24. Biorąc rzecz w uproszczeniu: przez diody płynie prąd i w tych diodach występuje spadek napięcia. Taki sam spadek napięcia występuje na złączach baza emiter tranzystorów. Przez te złącza, czyli przez tranzystory wyjściowe, popłynie więc prąd spoczynkowy, proporcjonalny do prądu płynącego przez diody. Przy okazji uzyskuje się dodatkową istotną zaletę – kompen-

sację cieplną prądu spoczynkowego. Otóż jak wiadomo, napięcie przewodzenia złącz krzemowych maleje wraz ze wzrostem temperatury. Jeśli diody D1 i D2 mają taką samą temperaturę, co tranzystory wyjściowe (w praktyce są zamocowane na radiatorze, wraz z tranzystorami wyjściowymi), wtedy nastąpi dobra kompensacja cieplna – prąd spoczynkowy prawie nie będzie się zmieniał, gdy tranzystory wyjściowe rozgrzeją się podczas pracy.



Rys. 24.

Podany sposób z diodami ma tę wadę, że trudno płynnie regulować spadek napięcia na diodach i tym samym prąd spoczynkowy. W praktyce bardzo często stosuje się „płynnie regulowaną multidiodę” w postaci małego zwykłego tranzystora i potencjometru. Dodatkowo stosuje się w obwodach emiterów rezystory o niewielkiej wartości, które stabilizują punkt pracy i zazwyczaj służą też jako czujniki prądu w obwodach zabezpieczenia przeciwzwarciowego (rys. 25). Potencjometr pełni tu taką samą rolę, jak na rys. 22, mianowicie pozwala płynnie regulować prąd spoczynkowy stopnia końcowego. Ponadto, jeśli ten dodatkowy tranzystor Tk jest zamontowany na radiatorze wraz z tranzystorami wyjściowymi i ma tę samą temperaturę, następuje kompensacja cieplna prądu spoczynkowego. Przy ustawieniu potencjometru jak na rys. 25a, napięcie U_{AB} jest kilkakrotnie większe od napięcia U_{BE} tranzystora. Przez tranzystory wyjściowe



Rys. 25.

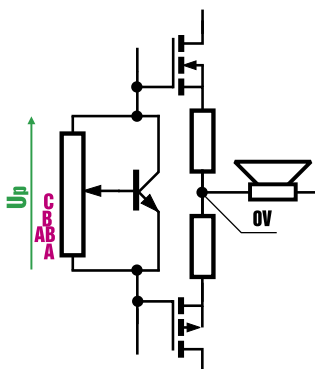
Niektórzy rozróżniają tylko klasy A i B, pomijając całkowicie klasę AB. Typowe wzmacniacze audio, pracujące w klasie AB błędnie nazywają wzmacniaczami klasy B.

plynie duży prąd i bez problemu można ustawić punkt pracy na środku dostępnej charakterystyki tranzystorów. Wtedy otrzymujemy najprawdziwszy wzmacniacz klasy A.

Przy ustawieniu potencjometru w pozycji z rys. 25b napięcie U_{AB} powinno być nieco niższe, niż suma napięć przewodzenia U_{BE} tranzystorów wyjściowych. Wtedy w spoczynku prąd przez tranzystory wyjściowe praktycznie nie płynie, ale nawet małe sygnały je otwierają. Otrzymujemy wzmacniacz klasy B. W praktyce, we wzmacniaczu tranzystorowym nie da się ustawić „czystej klasy B” z uwagi na wykładniczą charakterystykę przejściową tranzystora, niemniej można ustawić tak mały prąd spoczynkowy, żeby działanie było bardzo podobne do klasy B.

W praktyce, suwak potencjometru ustawia się w takiej pozycji pośredniej, żeby przez tranzystory płynął mniejszy lub większy prąd spoczynkowy, czyli żeby pracowały one w klasie AB.

W sytuacji z rys. 25c omawiany obwód z tranzystorem Tk zachowuje się natomiast jak pojedyncza dioda o napięciu przewodzenia 0,6...0,7 V i stopień wyjściowy pracuje wtedy w klasie C. W spoczynku prąd przez tranzystory wyjściowe nie płynie, a otwierają się one dopiero przy sygnałach o amplitudach większych niż około 0,3 V.



Rys. 26.

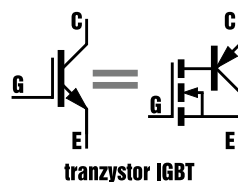
w wielu przypadkach zupełnie wystarczająca.

Od pewnego czasu znane są też tranzystory IGBT. Skrót IGBT pochodzi od *Insulated Gate Bipolar Transistor*, czyli tranzystor bipolarny z izolowaną bramką. Tranzystory takie można uważać za swego rodzaju układy Darlingtona czy raczej Sziklaï'ego - złożone są jednak nie z dwóch tranzystorów bipolarnych, tylko wejściowego tranzystora MOSFET i głównego bipolarnego tranzystora mocy (rys. 27). Wszystkie tranzystory IGBT są wysokonapięciowe, dużej mocy. Nie ma niskonapięciowych IGBT małej mocy. Przy wysokich napięciach i dużych prądach łączą one zalety tranzystorów MOSFET (łatwość sterowania napięciowego) i bipolarnych (małe napięcie nasycenia). Elementy te przeznaczone są do stosowania w energoelektronice, ale w literaturze można też znaleźć nieliczne projekty wzmacniaczy audio z tranzystorami IGBT. W nich też stosuje się rozwiązania podobne do opisanych.

Informacje te pokazują, że „kanoniczne” klasy wzmacniaczy różnią się jedynie wartościami prądów, a schemat nie ma większego znaczenia.

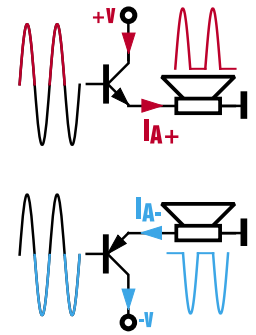
Błędne wyobrażenia

Przy okazji trzeba poruszyć jeszcze jedną sprawę: otóż o ile łatwo zrozumieć kwestie klas A, B, C w przeciwobnych wzmacniaczach lampowych (rys. 22), o tyle pewien kłopot może sprawiać intuicyjne pojmowanie sposobu pracy przeciwobnych wzmacniaczy tranzystorowych w klasie AB. Może się wydawać, niemniej niektórym wydaje się, że pracują one zupełnie inaczej i nie można tu mówić o analogii ze wzmacniaczem lampowym. Rodzą się też niekiedy błędne wyobrażenia o klasie A.



Rys. 27.

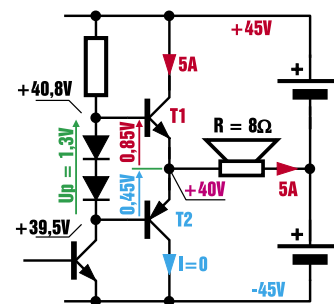
Istotnie, w klasycznych wzmacniaczach tranzystorowych sytuacja jest odmienna, niż w lampowych. Przede wszystkim trzeba pamiętać, że w lampowych układach *push-pull* lampy pracują w układzie wspólnej katody, czego tranzystorowym odpowiednikiem byłby układ ze wspólnym emiterem (OE). Tymczasem komplementarne tranzystory tworzą w istocie symetryczny wtórnik emiterowy, czyli pracują w układzie wspólnego kolektora (OC). Na rys. 28 pokazano uproszczoną zasadę działania przy obu półoknach sygnału.



Rys. 28.

I tu może się wydawać, że w przypadku klasy B wszystko jest w porządku, ale przy pracy w klasie AB, czyli przy niezbyt dużym prądzie spoczynkowym, oba tranzystory będą przewodzić cały czas! Taki pogląd wynika z głęboko zakorzenionego przekonania, że podczas pracy tranzystora, jego napięcie baza-emiter jest niezmiennie i wynosi około 0,7 V.

Rzeczywiście, gdyby napięcia U_{BE} były niezmiennie i niezależne od prądu tranzystora, praca wzmacniacza wyglądałaby inaczej, ale wspomniane wyobrażenie nie jest do końca prawdziwe. Nie chodzi przy tym wcale o zmiany cieplne napięcia U_{BE} . Napięcie przewodzenia przy małych prądach wynosi zazwyczaj około 0,6...0,7 V. W rzeczywistości zależy ono od prądu tranzystora. W tranzystorze mocy przy małym prądzie kolektora napięcie U_{BE} może wynosić tylko 0,55 V, natomiast w szczycie występowania może przekroczyć 0,8 V (porównaj rys. 17a). I już ta zależność napięcia U_{BE} od prądu tranzystora powoduje, że w prostym przeciwobnym wzmacniaczu tranzystorowym klasy AB następuje jednak całkowite zatkanie „nieczynnego” w danej chwili tranzystora.



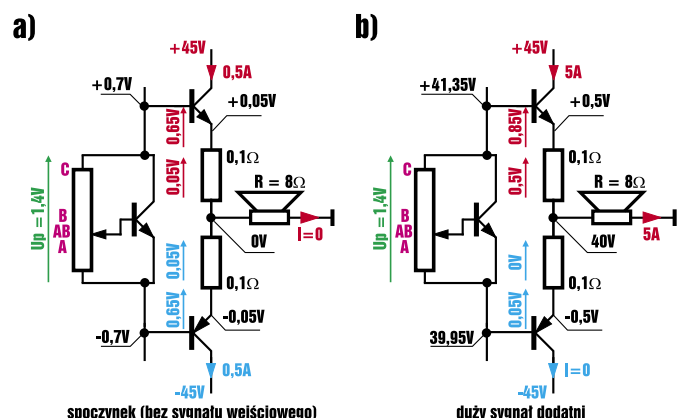
Rys. 29.

Ilustruje to przykład na rys. 29. Przyjmujemy, że napięcie polaryzujące U_p nie zmienia się i wynosi 1,3 V. Ponieważ przy przepływie dużego prądu obciążenia napięcie U_{BE} tranzystora T1 wzrasta do 0,85 V, więc dla tranzystora T2 pozostaje tylko 0,45 V, co powoduje jego całkowite zatkanie.

wite zatkanie.

W praktycznych układach, w obwodach emiterów występują dodatkowe rezystory. Wtedy tym bardziej następuje zatkanie drugiego tranzystora, ponieważ w grę wchodzi też spadki napięcia na tych rezystorach. Hipotetyczny przykład pokazany jest na rys. 30.

W przypadku stopni końcowych klasy AB z tranzystorami MOSFET zależności są podobne i przy występowaniu jednego tranzystora, ten drugi zatyka się całkowicie.

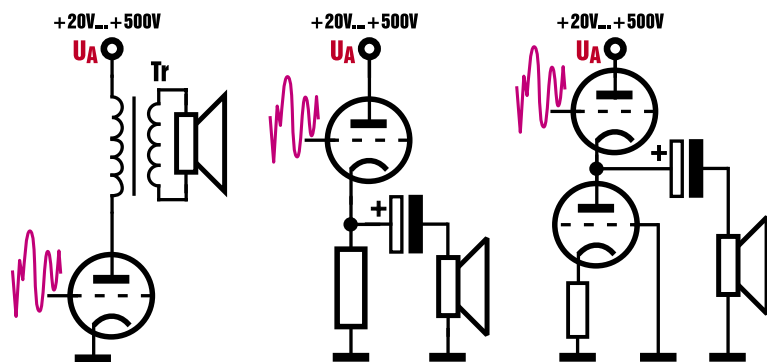


Rys. 30.

Koniecznienie trzeba też wspomnieć o pewnych błędnych wyobrażeniach dotyczących klasy A.

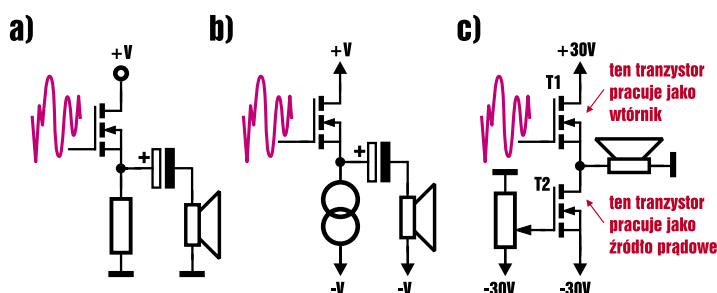
Błędny jest pogląd, że wzmacniacz klasy A musi być zbudowany z pojedynczych elementów (lamp, tranzystorów), a nie układów scalonych. Choć rzeczywiście zdecydowana większość wzmacniaczy klasy A jest budowana z elementów dyskretnych, jednak jak wskazują wcześniejsze informacje, nie byłoby problemu ze zbudowaniem scalonego wzmacniacza klasy A. Pamiętajmy, że w przypadku klas A...C, klasa nie ma nic wspólnego z budową, a jedynie z faktem, jak zachowują się prądy w stopniu wyjściowym.

Niektórzy hobbysci na podstawie wyrywkowych informacji i spotykanych schematów błędnie sądzą, że wszystkie współczesne wzmacniacze *przeciwsobne* (*push-pull*) pracują w klasie AB i błędnie uważają, iż wzmacniacze



Rys. 31.

klasy A nie są przeciwsobne, tylko „pojedyncze” (*single ended*). Wcześniejszy materiał jasno pokazuje, że każdy wzmacniacz przeciwsobny może pracować w klasie A – wystarczy ustawić odpowiednio duży prąd spoczynkowy. Prawdą jest jednak, że hobbysci, zwłaszcza ci utożsamiający klasę A z urządzeniami audiofilskimi, z różnych względów, także tych oszczędnościowych, chętnie budują prostsze, „pojedyncze” wzmacniacze klasy A. Warto pamiętać, iż rzeczywista sprawność wzmacniaczy klasy A jest



Rys. 32

rzędu kilku do kilkunastu procent (teoretycznie do 25%). Wzmacniacz klasy A o mocy 100 W musiałby więc pobierać z sieci energetycznej i rozpraszając w postaci ciepła prawie 1000 W mocy. Problem nie tylko w kosztach energii i grzaniu pomieszczenia takim kilowatowym piecykiem. Rozprosze-

nie tak dużej mocy strat cieplnych wymagałoby użycia wielu tranzystorów i bardzo wydajnego systemu ich chłodzenia, co jest niełatwe i kosztowne.

W związku z tym budowane „pojedyncze” wzmacniacze klasy A często są urządzeniami o małej mocy wyjściowej. Wiele z nich może pracować jedynie jako wzmacniacze słuchawkowe o mocy wyjściowej rzędu kilkudziesięciu do kilkuset miliwatów. Uprozczone przykłady realizacji „pojedynczych” wzmacniaczy klasy A pokazane są na rys. 31. Oprócz znanego „od zawsze” jednolampowego wzmacniacza z transformatorem głośnikowym (rys. 31a) widać tu stopień wyjściowy z wtórnikiem katodowym z obciążeniem w postaci rezystora (rys. 31b) lub drugiej lampy pełniącej rolę obciążenia podobnego do źródła prądowego (rys. 31c). Dość często można spotkać podobne rozwiązania z zastosowaniem tranzystorów polowych MOSFET. O ile z lampy w układach wtórnika katodowego z rys. 31b i 31c nie można uzyskać znaczącej mocy wyjściowej i mogą to być co najwyżej wzmacniacze słuchawkowe, o tyle stosując analogicznie tranzystory MOSFET, można zbudować użyteczne wzmacniacze klasy A o mocy wyjściowej rzędu kilku watów, a nawet większej. W układzie z rys. 32a obciążeniem jest rezystor o odpowiednio dużej mocy. Często zamiast rezystora stosuje się obciążenie w postaci źródła prądowego – rys. 32b. W uproszczonym układzie z rys. 32c rolę tę pełni tranzystor T2. Pracuje on przy stałym napięciu bramka-źródło i przez to płynie przez niego prąd stały o nieziennej wartości, czyli jest źródłem prądowym.

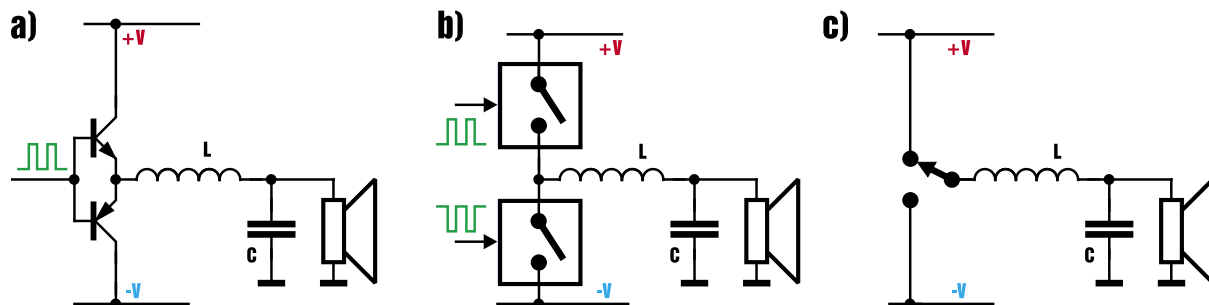
Rozwiązania z tranzystorami MOSFET są o tyle godne uwagi, że tranzystory polowe pod wieloma względami mają właściwości podobne do lamp. Choć podobną moc można uzyskać stosując zamiast MOSFET-ów bipolarne tranzystory mocy, w praktyce nie buduje się wzmacniaczy klasy A w oparciu o tranzystory bipolarne, głównie ze względu na złą opinię, jaką cieszą się takie rozwiązania w środowisku audiofilów nieelektroników.

A przy okazji jeszcze jedno błędne wyobrażenie: niektórzy hobbysci, słysząc o ciągłości prądu i o omówionych właśnie rozwiązaniach ze źródłem prądowym, gotowi są twierdzić, że małe zniekształcenia wynikają z tego, że we wzmacniaczu klasy A prąd elementu czynnego jest cały czas taki sam. Oczywiście jest to nieprawdą w przypadku przeciwsobnych wzmacniaczy lampowych i tranzystorowych (rys. 5 i 18). Tak samo jest w układach ze źródłem prądowym, choćby z rys. 32c. Owszem, niezmienny jest prąd tranzystora T2, natomiast prąd głównego tranzystora T1 zmienia się w szerokich granicach, jak we wszystkich wzmacniaczach klasy A.

Zanim przejdziemy do klas D, E, F, G, H ... Z, warto się zapoznać z podsumowaniem dotychczasowych rozważań, zamieszczonym w tabeli *Kanoniczne klasy A...C*.

Klasa D

Z dotychczasowych rozważań zdaje się wynikać, że we wzmacniaczach audio głównym celem jest zapewnienie jak największej liniowości stopnia końcowego, czego najjaśniejszym przykładem są audiofilskie wzmacniacze klasy A. Wzmacniacze klasy D są jaskrawym zaprzeczeniem takiego wniosku. Wzmacniacz klasy D można postrzegać jako kolejny duży krok w „rozwoju” klasy C – z początku określenie *klasa*

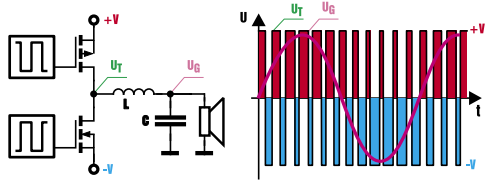


Rys. 33.

D dotyczyło zresztą impulsowych wzmacniaczy z obwodem rezonansowym, natomiast „prawdziwa” współczesna klasa D, dotycząca wzmacniaczy audio, ma już przynajmniej 60 lat (patent na półprzewodnikowy mostkowy wzmacniacz serwo pochodzi z roku 1954).

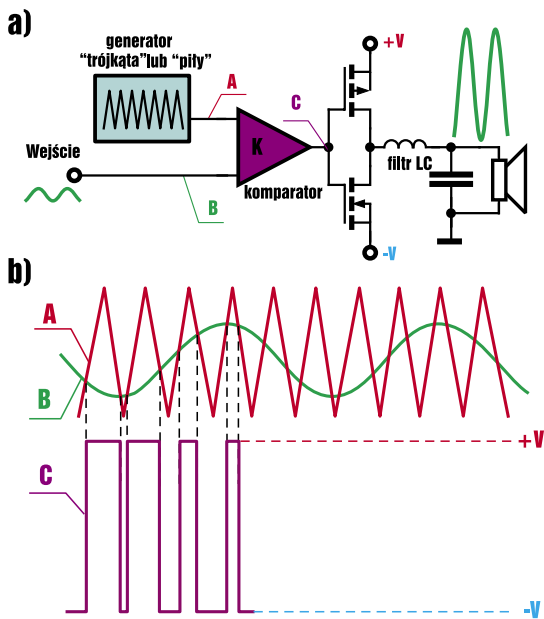
Jak wiadomo, w klasie C, małe sygnały nie powodują reakcji stopnia końcowego, a sygnał wyjściowy nie odzwierciedla subtelności przebiegu wejściowego (rys. 23). We wzmacniaczu klasy D chwilowy prąd tranzystorów stopnia wyjściowego w ogóle nie odzwierciedla wielkości sygnału wejściowego, ponieważ... oba tranzystory będą na przemian albo całkowicie otwierane, albo całkowicie zamykane. Stopień końcowy wzmacniacza klasy D mógłby być zrealizowany w oparciu o wzmacniacz klasy C, według idei z rys. 33a, ponieważ jednak tranzystory wyjściowe pracują albo w stanie zatkania, albo pełnego otwarcia, bez stanów pośrednich, stopień wyjściowy można narysować w postaci dwóch elektronicznych kluczy, jak na rys. 33b, albo jeszcze lepiej w postaci przełącznika, jak na rys. 33c.

Wbrew pozorom, za pomocą „zwykłego” przełącznika z rys. 33c można zrealizować wzmacniacz mocy i to o bardzo dobrych parametrach. Pod warunkiem jednak, że przełączanie będzie odbywać się z częstotliwością kilka-, bądź kilkunastokrotnie większą od najwyższej częstotliwości sygnału audio, i że współczynnik wypełnienia impulsów będzie proporcjonalny do chwilowej wartości sygnału audio. Sygnał wytwarzany przez stopień końcowy wzmacniacza klasy D jest więc ciągiem prostokątnych impulsów o zmiennym współczynniku wypełnienia. Regulując współ-



Rys. 34

czynnik wypełnienia reguluje się średnią wartość impulsowego sygnału wyjściowego. Stopień końcowy wytwarza na swym wyjściu sygnał prostokątny o częstotliwości dużo większej od częstotliwości sygnałów audio, jednak prosty filtr LC przepuszcza do obciążenia tylko odtworzone sygnały audio. Ideę zilustrowano na rys. 34. Tranzystory-klucze w stopniu końcowym pracują na przemian: gdy jeden jest otwarty, drugi jest zamknięty. Z reguły stopień wyjściowy zawiera tranzystory MOSFET. Na rys. 35 pokazano zasadę działania klasycznego wzmacniacza klasy D, która okazuje się zaskakująco prosta. Można powiedzieć, że chwilowa wartość sygnału wejściowego jest porównywana z przebiegiem trójkątnym o dużej częstotli-



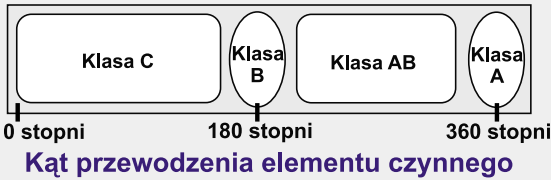
Rys. 35.

wości. Wypełnienie wyjściowego przebiegu prostokątnego odzwierciedla chwilową wartość amplitudy sygnału wejściowego. Jest to więc rodzaj przetwornika, w którym chwilowa amplituda sygnału wejściowego decyduje o współczynniku wypełnienia prostokątnego sygnału wyjściowego.

Co ciekawe, idea ta zapewnia wręcz idealne odwzorowanie na obciążeniu kształtu sygnału wejściowego. Fakt przekształcania na sygnał prostokątny nie powoduje błędów i zniekształceń, o ile częstotliwość przebiegu taktującego będzie odpowiednio wysoka. Teoretycznie można byłoby więc w ten sposób uzyskać wzmacniacz o pomijalnie małych zniekształceniach. Niestety, w praktyce źródłem błędów będzie zarówno nieliniowość

Kanoniczne klasy A...C

Klasa wzmacniacza nic nie mówi ani o elementach czynnych, użytych do jego budowy (lampy, tranzystory bipolarne, IGBT MOSFET), ani nawet o rozwiązaniu układowym stopnia końcowego. Klasa wzmacniacza określa przede wszystkim działanie jego stopnia wyjściowego. O klasie wzmacniacza decyduje to, co dzieje się z prądem (prądami) w tym stopniu wyjściowym. Jak się okazuje, klasyfikacja w istocie opiera się na... długości czasu pracy elementów czynnych stopnia końcowego. Częściej mówimy nie o czasie przewodzenia, tylko o kącie przewodzenia, przy czym kąt 360 stopni to przewodzenie przez cały okres, a 180 stopni – przez pół okresu. Zilustrowano to na poniższym rysunku.



W przypadku wzmacniacza przeciwobnego (push-pull), ten sam układ może być wzmacniaczem klasy A, AB, B, C, zależnie od warunków pracy stopnia końcowego, ustawianych jednym potencjometrem montażowym.

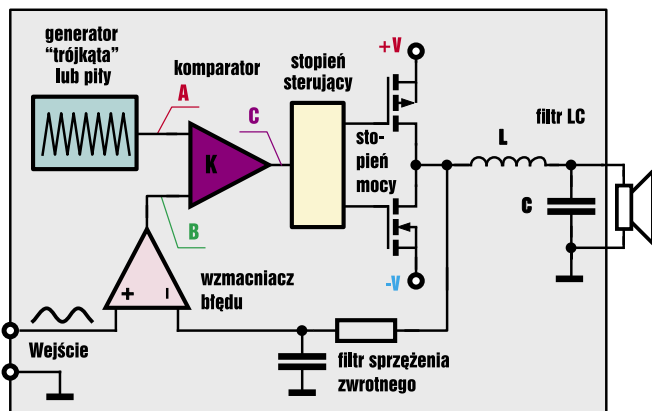
Klasa A. We wzmacniaczu klasy A podczas normalnej pracy prąd przez element czynny (lampę, tranzystor) płynie nieprzerwanie, przez 100% czasu. W żadnej chwili nie zmniejsza się do zera. Poważną wadą wszystkich wzmacniaczy klasy A jest znikoma sprawność energetyczna, wynosząca od kilku do co najwyżej 20%. W praktyce oznacza to konieczność stosowania dużych zasilaczy i potężnych radiatorów dla tranzystorów. Według powszechnej opinii, zaletą są małe zniekształcenia i jakość dźwięku lepsza, niż w innych klasach. Taka opinia była bezwzględnie prawdziwa kilkadziesiąt lat temu, natomiast dziś praca w klasie A nie gwarantuje najlepszej jakości dźwięku z uwagi na ulepszenia i rozwiązania stosowane w innych klasach.

Klasa B. Jeśli w spoczynku, przy braku sygnału sterującego, lampy (tranzystory) nie przewodzą prądu, ale są ustawione dokładnie na granicy przewodzenia, wtedy wzmacniacz będzie pracował w klasie B. Po pojawieniu się choćby niewielkiego sygnału zmiennego tranzystory będą włączane na przemian. Podczas normalnej pracy wzmacniacza przeciwobnego klasy B, każdy z dwóch elementów czynnych przewodzi prąd dokładnie przez 50% cyklu. 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 trudno jest utrzymać lampę lub tranzystor dokładnie na granicy przewodzenia, ponadto przy małych sygnałach występują znaczne zniekształcenia, dlatego wzmacniaczy audio pracujących w „czystej” klasie B praktycznie nie spotyka się.

Klasa AB. W spoczynku w stopniu końcowym przez elementy czynne płynie niewielki prąd. Podczas normalnej pracy wzmacniacza przeciwobnego klasy AB, każdy z dwóch elementów czynnych przewodzi prąd przez nieco więcej, niż 50% czasu pracy. Można powiedzieć, że przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje w klasie A, przy dużych – podobnie jak w klasie B. Wzmacniacze klasy AB mają przy maksymalnej mocy sprawność energetyczną około 60...70%, zależnie od wielkości prądu spoczynkowego, czyli głębokości klasy AB. Praktycznie wszystkie klasyczne wzmacniacze mocy audio pracują w klasie AB.

Klasy AB1, AB2. Podział na klasy AB1, AB2 miał głęboki sens w przypadku wzmacniaczy lampowych. We wzmacniaczu klasy AB1 nigdy nie płynął prąd siatki, natomiast we wzmacniaczu klasy AB2 możliwe było pojawienie się prądu siatki. Można byłoby dopatrywać się takich analogii we wzmacniaczach tranzystorowych, zwłaszcza w przypadku tranzystorów JFET, lecz tranzystory takie nie są wykorzystywane w stopniach końcowych wzmacniaczy.

Klasa C. Jeśli nie tylko w spoczynku, ale także przy małych sygnałach, elementy czynne stopnia końcowego wzmacniacza nie będą przewodzić, wtedy mamy do czynienia ze wzmacniaczem klasy C, w którym każdy element czynny przewodzi prąd krócej niż przez 50% cyklu. O ile w klasie B przynajmniej teoretycznie możliwe jest uzyskanie na wyjściu sygnału o kształcie dokładnie takim samym, jak na wejściu, o tyle we wzmacniaczu klasy C jest to niemożliwe. Mniejsze sygnały w ogóle przezeń nie przechodzą. Większe sygnały są poważnie zdeformowane i zwykle nie przypominają przebiegu wejściowego. Wzmacniacze klasy C nie są wykorzystywane w technice audio. Stosowane są na przykład w sygnalizatorach alarmowych, gdzie ważna jest głośność oraz w układach wysokiej częstotliwości, z reguły we współpracy z obwodem rezonansowym.



Rys. 36.

przebiegu trójkątnego, szumy i zakłócenia w szynach zasilania, a przede wszystkim rozmaite aspekty niedoskonałości przełącznika zawierającego tranzystory MOSFET. Dlatego we wzmacniaczach klasy D stosuje się w praktyce bardziej złożone rozwiązania, zawierające obwody sprzężenia zwrotnego. Na rys. 36 pokazany jest schemat blokowy typowego wzmacniacza klasy D. W sumie taki wzmacniacz impulsowy jest dużo bardziej skomplikowany od „zwykłych” wzmacniaczy klasy AB.

Po co ta cała komplikacja? Jeśli klucze – przełączniki 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 przyczyną strat jest choćby rezystancja cewki filtra wyjściowego, niezerowa rezystancja otwartych tranzystorów, a także niedoskonała szybkość ich przełączania. Rzeczywiste wzmacniacze klasy D osiągają sprawność nawet 90...95%, co i tak jest rewelacyjnym wynikiem w porównaniu ze sprawnością wzmacniacza klasy B, wynoszącą teoretycznie 78,5%, w praktyce 50...65%.

Ich kluczową zaletą jest więc wysoka sprawność energetyczna. O ile sprawność jest rzeczywiście imponująca, o tyle zniekształcenia nieliniowe i intermodulacyjne w typowych rozwiązaniach są rzędu 1%. „Zwykle”, typowe wzmacniacze klasy D nie realizują więc odwiecznego marzenia: jednocześnie wysokiej wierności odtwarzania i dużej sprawności energetycznej. Okazuje się jednak, że postęp techniczny pozwala konstruować wzmacniacze D o coraz lepszych parametrach, dlatego wzmacniacze klasy D pomalutku, ale systematycznie, znajdują coraz szersze miejsce na rynku.

Po cichu weszły do miniaturowych urządzeń zasilanych z baterii. Tu kluczową sprawą jest zmniejszenie zużycia energii. Wzmacniacze klasy D pozwalają przedłużyć żywotność baterii nawet trzykrotnie, a w niektórych przypadkach jeszcze więcej. Dodatkowo, dzięki możliwości pracy bez radiatorów możliwa jest daleko posunięta miniaturyzacja.

W przypadku dużych wzmacniaczy zasilanych z sieci zmniejszenie poboru mocy z sieci nie jest najważniejsze. Zmniejszenie strat z około 35...50% do 5...10% oznacza kilkukrotną redukcję mocy strat, a tym samym możliwość zastosowania małych i bardzo małych radiatorów lub nawet obycie się bez nich.

Przykłady wzmacniaczy klasy D

Propozycje budowy wzmacniaczy klasy D można było znaleźć już od dawna, choćby w notach aplikacyjnych firm Motorola czy Harris Semiconductor. Obecnie dostępne są gotowe układy scalone, pozwalające na względnie łatwą realizację wzmacniaczy klasy D. Układy takie produkują między innymi ST, NXP (Philips), TI, National.

W przypadku wzmacniaczy klasy D od urządzeń baterijnych poważnym problemem staje się miniaturyzacja. Przykładowo miniaturowy wzmacniacz typu TS4962M o mocy maksymalnej 3 W, przeznaczony jest m.in. do telefonów, co pokazano na fot. 37, pochodzącej z materiałów prasowych firmy ST. Wzmacniacz ten ma genialnie prosty układ aplikacyjny (rys. 38). Niestety, mało który hobbysta podejmie się montażu tego

D jak digital?

Słowo cyfrowy i litera D (od angielskiego *digital*) przeciętnemu odbiorcy kojarzy się z nowoczesnością i wysoką jakością, tymczasem klasyczne wzmacniacze klasy D ze swej natury wcale nie wyróżniają się szczególnie dobrą jakością. Nie są też wcale wzmacniaczami cyfrowymi.

Wzmacniacz klasy D można słusznie nazwać wzmacniaczem impulsowym (*switching power amplifier*). Dość często spotyka się określenie *PWM amplifier*, gdzie PWM to *Pulse Width Modulation*, czyli modulacja szerokości impulsu. W odniesieniu do wzmacniaczy klasy D zupełnie fałszywe jest natomiast, stosowane ze względów reklamowych, określenie *wzmacniacz cyfrowy (digital amplifier)*. Zauważ, że w klasycznym wzmacniaczu klasy D nie ma nigdzie sygnałów cyfrowych, reprezentujących liczby. Jest wprawdzie ciąg impulsów o zmiennym współczynniku wypełnienia, ale współczynnik ten zmienia się płynnie, w sposób analogowy, a nie dyskretny. Jedynym podobieństwem do układów cyfrowych jest występowanie przebiegu prostokątnego, ale to zdecydowanie za mało, żeby mówić o wzmacniaczu cyfrowym.

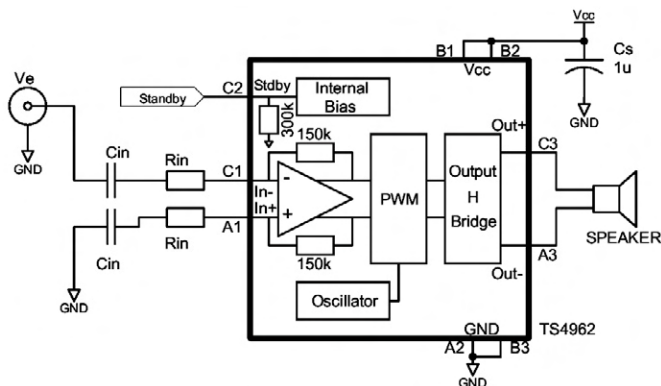
Klasycznych wzmacniaczy klasy D nie można więc w żaden sposób nazywać wzmacniaczami cyfrowymi!



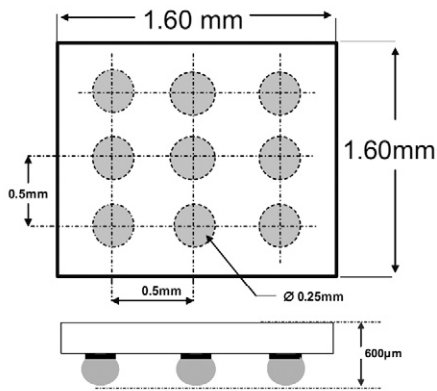
Fot. 37.

maleństwa – wymiary układu scalonego to 1,6x1,6x0,6 mm, jak pokazuje rys. 39, pochodzący z katalogu firmy.

Na drugim biegunie mamy scalone wzmacniacze klasy D o mocy ponad 100 W. Na rys. 40 pokazano schemat aplikacyjny układu TDF8591TH w wersji stereofonicznej. Kostka ta może być zasilana napięciem symetrycznym $\pm 14... \pm 29$ V. Maksymalna moc wyjściowa wersji stereo to 2 x 100 W, wersji monofonicznej 1 x 310 W. Schemat aplikacyjny jest, jak na tak dużą moc, stosunkowo prosty i można w ten sposób zbudować wzmacniacz o imponującej mocy i zaskakująco małym radiatorem. W praktyce nie trzeba bowiem obliczać radiatora dla pełnej mocy (i sprawności ponad 90%), ponieważ sygnały muzyczne mają znaczny tzw. współczynnik szczytu (CF), więc średnie straty mocy są zaskakująco niewielkie.

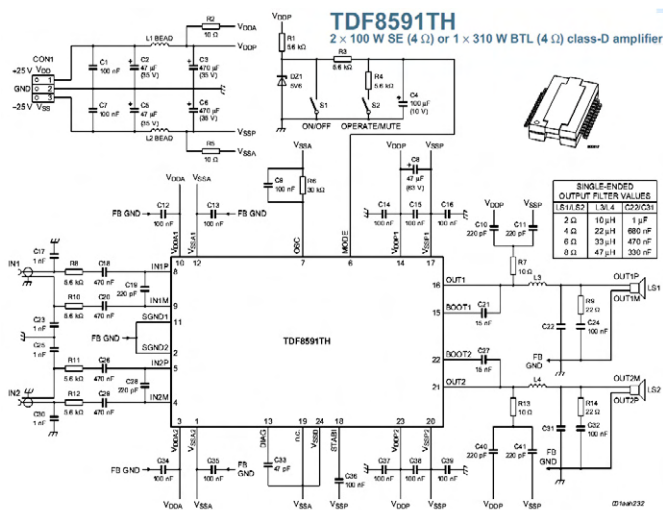


Rys. 38.



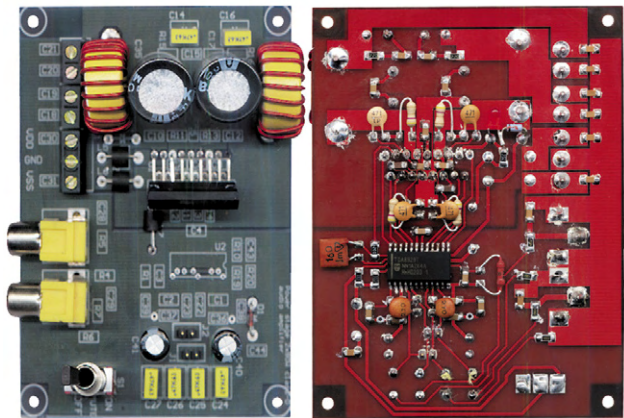
Die size: 1.6mm x 1.6mm $\pm 30\mu\text{m}$
Die height (including bumps): 600 μm

Rys. 39.



Rys. 40.

W przypadku wzmacniaczy klasy D dużej mocy, z uwagi na duże częstotliwości pracy, ponad 100 kHz i duże prądy, wyzwaniem jest prawid-



Fot. 41.

łowe zaprojektowanie płytki, a w szczególności realizacja obwodów zasilania i ich odsprężnienie. Na fot. 41 pokazano realizację wzmacniacza na układach Philipsa wcześniejszej generacji (TDA8927/TDA8929). W przypadku potężniejszej i nowszej kostki TDF8591TH pewną trudność sprawi też ręczne wlutowanie układu scalonego. Obudowa SMD o oznaczeniu SOT566-3 (HSOP24) ma wymiary tylko 16x11 mm, a nóżki rozłożone są w rastrze 1 mm. Niemniej w miarę możliwości warto zająć się praktyczną realizacją wzmacniaczy klasy D. Są to bardzo interesujące rozwiązania, a ponadto przyszłość bez wątpienia należy do wzmacniaczy opartych na koncepcji wzmacniacza impulsowego PWM.

Klasa S

W literaturze spotyka się też wzmianki o klasie S.

Jeden trop dotyczy rozwiązań przedstawionych po raz pierwszy w roku 1932(!), których początki sięgają lat jeszcze wcześniejszych. Wykorzystuje się tam zasadę modulacji współczynnika wypełnienia impulsów i amplitudy. Wtedy oprócz lamp elektronowych nie było innych elementów czynnych, a lampy mają słabe właściwości podczas pracy w roli przełączników. Dlatego wzmacniacze takiej archaicznej klasy S nie są wykorzystywane w praktyce. Można jednak śmiało powiedzieć, że dawna klasa S to obecna klasa D. Na marginesie jako ciekawostkę można przytoczyć fakt, że w roku 2004 został przyznany patent na... lampowy wzmacniacz klasy D (rys. 42).



mniej kilogramów
więcej mocy



Profesjonalne

GŁOŚNIKI NEODYMOWE



Dystrybutor

81-881 Sopot, ul. Cieszyńskiego 4, tel./fax 058 550 66 46, 058 551 90 05
www.box.com.pl





(19)

Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(12)

(21) Aktenzeichen: 103 00 195.6

(22) Anmeldetag: 08.01.2003

(43) Offenlegungstag: 22.07.2004

(71) Anmelder:
Althoff, Jürgen, Dipl.-Ing., 48429 Rheine, DE

(72) Erfinder:
gleich Anmelder

(10) DE 103 00 195 A1 2004.07.22

Offenlegungsschrift

(51) Int. Cl.: H03F 3/181
H03F 1/02, H03F 3/183

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:
DE 695 26 732 T2
DE 695 22 092 T2
US 24 38 850
EP 00 42 272 A1
EP 00 38 440 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

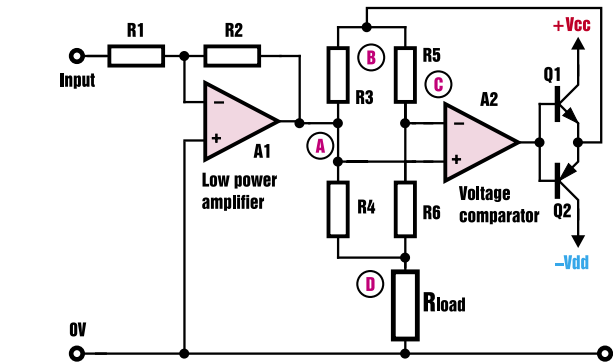
Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: Class D Röhrenverstärker

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Niederfrequenzverstärker mit Impulsbetrieb beschrieben, wobei zur Impulsaufbereitung ein Multivibrator mit veränderbarem Tastverhältnis und fester Taktrate eingeführt wird, dessen Ausgangsimpulse über die Zeit-Pegelflächendifferenzen zweier unmittelbar aufeinander folgender Impulse eines Taktes ein Pegeläquivalent der Eingangsspannung bilden. Die Erfindung ermöglicht den einfachen Aufbau eines digitalen Röhrenverstärkers.

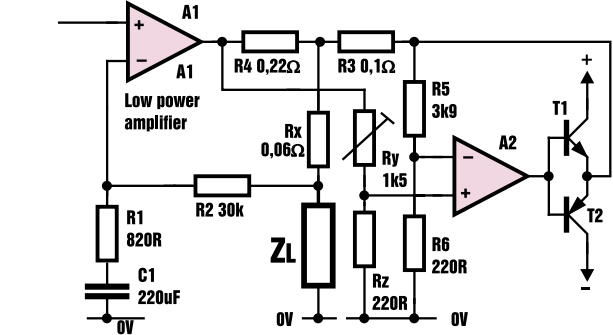
Rys. 42.

Drugi trop dotyczący klasy S jest znacznie lepiej znany. Chodzi o znaną od końca lat 20, ale ze względów praktycznych rozwijaną dopiero od połowy lat 70. koncepcję „wysyłania błędu w przód” (Error Feed Forward) i propozycję dr A. M. Sandmana, który w roku 1982 zaproponował wzmacniacz mocy audio klasy S, zawierający w istocie dwa wzmacniacze.



Rys. 43.

Jeden to dobrej jakości, ale małej mocy i małej wydajności prądowej wzmacniacz klasy AB, drugi to wzmacniacz pomocniczy o dużej mocy i słabej jakości. Z grubsza biorąc, mały wzmacniacz pilnuje dobrej jakości sygnału wyjściowego, natomiast moc dostarczana jest głównie ze wzmacniacza pomocniczego. Idea wzmacniacza audio klasy S pokazana jest na rys. 43. Na pierwszy rzut oka wygląda to bardzo dziwnie, zwłaszcza z uwagi na obecność mostka rezystorowego. W rzeczywistości rezystory mostka mają małą wartość, zwłaszcza R3 i R4. Zasada działania okazuje się jednak zaskakująca i nietłwa do zrozumienia. Dwa tranzystory pracujące w klasie B lub nawet C są „głównymi dostarczycielami mocy”, a co istotne, z uwagi na obecność pętli ze wzmacniaczem A, wzmacniacz A1 „widzi” w punkcie A obciążenie o dużej rezystancji. A właśnie ta duża rezystancja zastępująca umożliwia redukcję zniekształceń do znikomej war-



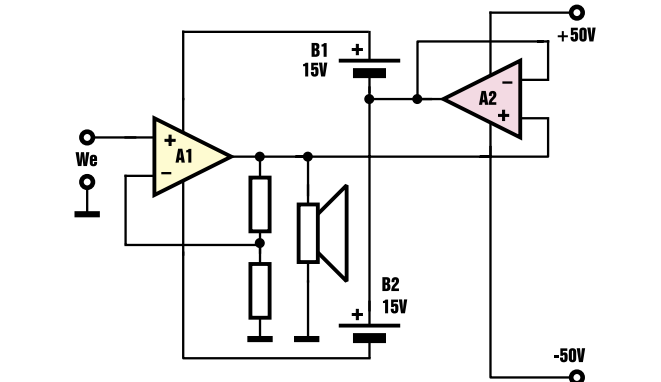
Rys. 44.

tości. Wzmacniacz A1 niejako „wygładza” przebieg wyjściowy, dodając lub odejmując nieco do przebiegu wytwarzanego przez A2 i tranzystory, zwłaszcza w okolicach przejścia przebiegu przez zero.

Zagadnienie jest złożone, a zainteresowani mogą samodzielnie poszukać szerszych informacji w Sieci, wpisując w wyszukiwarkę takie hasła jak *Sandman*, „class S” oraz *Error Feed Forward*.

Klasa AA

Koncepcja zaproponowana teoretycznie w literaturze w roku 1982 (wspomniany A. M Sandman w *Wireless World*), praktycznie identyczna z klasą S, została pod koniec lat 80. opatentowana, a niektórzy mówią: skradziona, przez koncern Matsushita i wykorzystana we wzmacniaczach tak zwanej klasy AA (Technics SE-A100). Na rys. 44 pokazano schemat blokowy tego wzmacniacza klasy AA.



Rys. 45.

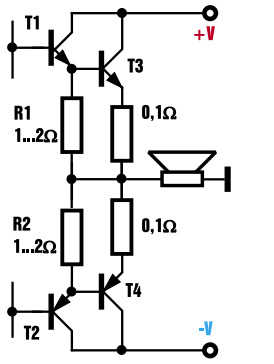
Super class A

Na rys. 45 przedstawiono 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 interesujący sposób – całkowite napięcie zasilające ten wzmacniacz nie jest stałe, tylko zmienia się w takt sygnału. Oprócz dwóch 15-woltowych źródeł B1, B2 (w rzeczywistości są to dwa zasilacze) wykorzystuje się też napięcie ± 50 V. Drugi wzmacniacz A2, pracujący w klasie AB lub B zmienia napięcia zasilające. Ponieważ jego zadaniem jest tylko zmiana napięć zasilania w takt sygnału, takie parametry jak liniowość nie są istotne, więc z powodzeniem może to być stosunkowo prosty wzmacniacz pracujący w klasie B.

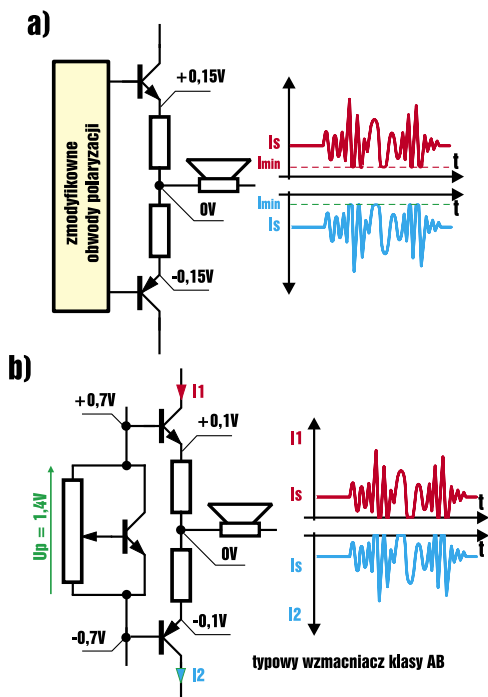
Nietrudno sobie wyobrazić kolejną modyfikację układu z rys. 45, polegającą na zastąpieniu wzmacniacza klasy B przez jeszcze ekonomiczniejszy wzmacniacz klasy D, bądź specjalny zasilacz impulsowy o napięciu zależnym od wielkości sygnału. I takie rozwiązania istnieją.

Klasa AB+B, AB+C

Klasa AB plus B (AB+B). Choć w literaturze można znaleźć informacje, że dany wzmacniacz ma stopnie końcowe pracujące w klasie AB+B, jednak w istocie nie jest to żadna oddzielna klasa, tylko zwykły wzmacniacz klasy AB ze specyficznie włączonymi tranzystorami. Ideę zilustrowano w uproszczeniu na rys. 46. Tranzystory T1, T2 pracują w klasie AB. Co istotne, rezystory R1 i R2 mają tak dobraną wartość, że przy małych sygnałach, gdy prądy wyjściowe są na tyle małe, spadki napięcia na tych rezystorach są mniejsze niż 0,6 V. Przy takich małych sygnałach tranzystory T3 i T4 nie pracują – są zatkane. Tran-



Rys. 46.



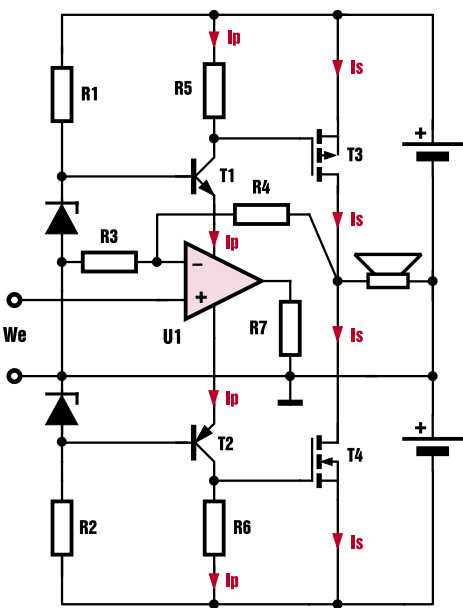
Rys. 47.

zystory T3 i T4 otwierają się dopiero przy dużych sygnałach. Tranzystory T3, T4 pracują więc niejako w klasie C, jednak prawdopodobnie ze względów marketingowych takie rozwiązanie nazywa się klasą AB+B, a nie AB+C. Taki sposób pracy nie ma jakichś istotnych zalet w stosunku do klasycznych wzmacniaczy AB.

Pseudoklasa A

Powszechnie znane są opinie, że wzmacniacz klasy A dlatego ma małe zniekształcenia, ponieważ elementy czynne cały czas przewodzą prąd oraz najwięcej zniekształceń wynika z tego, że w klasie AB w pewnych chwilach przestaje płynąć prąd. Trzeba wyraźnie stwierdzić, że takie opinie były w stu procentach trafne kilkadziesiąt lat temu, w epoce wzmacniaczy lampowych i pierwszych tranzystorowych, zatem w takich stwierdzeniach jest ziarno prawdy. A jeśli tak, to niektórym elektronikom nasuwa się 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 minimalnej. Przebiegi napięć i prądów tak zmodyfikowanego wzmacniacza klasy AB wyglądałyby wtedy jak na rys. 47a. Na rys. 47b dla porównania pokazane są przebiegi w „zwykłym” wzmacniaczu klasy AB. Takiego przebiegu prądu nie można zrealizować przy klasycznych układach polaryzacji pracujących na zasadzie pokazanej na rys. 47b, bo mówiąc w największym uproszczeniu, do zatkania tranzystora wystarczy mniejsza różnica napięcia niż do jego otwarcia (patrz wcześniejsze rys. 29, 30). Można to jednak zrealizować zupełnie inaczej, na przykład na zasadzie pokazanej w wielkim uproszczeniu na rys. 48 (przy założeniu, że prądy zasilania wzmacniacza operacyjnego nigdy nie zmniejszają się podczas pracy poniżej wartości spoczynkowej I_p). Przez końcówki wzmacniacza operacyjnego U1 płynie jakiś prąd spoczynkowy I_p . Wywołuje on na rezystorach R5 i R6 spadek napięcia, który nieco otwiera tranzystory T3 i T4, powodując przepływ prądu spoczynkowego I_s . 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 lub T4.

Spotyka się takie wzmacniacze – z grubsza biorąc, tak zbudowany jest wzmacniacz Vellemana o oznaczeniu K4010. Postawiony na rys. 47a warunek ciągłości prądu można spełnić w jeszcze inny sposób. Często rozwiązania są tajemnicą firmową, a tego typu wzmacniacze ze względów reklamowych zalicza się do kategorii



Rys. 48.

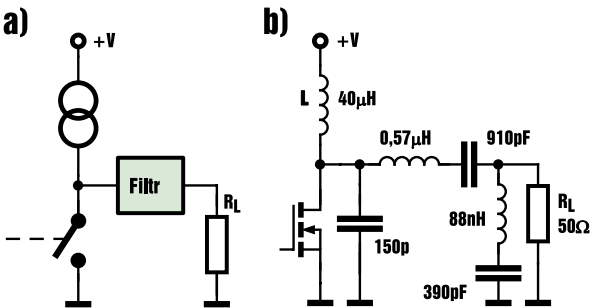
określanych jako *ekonomiczna klasa A*, a czasem nawet *klasa AA*. Absolutnie nie znaczy to, że wzmacniacz taki można zaliczyć do „prawdziwej” klasy A – jest to co najwyżej *pseudoklasa A*. Co prawda warunek ciągłości prądu jest spełniony, jednak trzeba bardzo wyraźnie podkreślić, że poziom zniekształceń zależy od wielu czynników, nie tylko od ciągłości prądu. Sam fakt, że tranzystory stopnia wyjściowego cały czas przewodzą prąd, nie gwarantuje jeszcze znakomitej jakości dźwięku tego wzmacniacza. Co więcej, może się okazać, i często okazuje się, że dopracowany wzmacniacz klasy AB daje dźwięk zdecydowanie lepszy niż najprawdziwszy wzmacniacz klasy A, nie mówiąc już o wzmacniaczu pseudoklas A. Właśnie ze względu na fakt, że warunek ciągłości prądu nie decyduje o wszystkim, wzmacniacze o właściwościach pokazanych na rys. 47a należy zaliczyć do klasy AB. Określenie *klasa A* powinno pozostać zarezerwowane do układów, w których przebieg prądu (a nie tylko napięcia na obciążeniu) wiernie odzwierciedla kształt sygnału audio.

Na razie omówiliśmy klasy A...D oraz niektóre pokrewne. Zanim zajmemy się kolejnymi klasami wzmacniaczy audio, z kronikarskiego obowiązku trzeba wspomnieć o kolejnych literkach i klasach: E, F i pokrewnych.

Klasy E, F, M

Spśród licznych klas, wzmacniacze klas E, F, M nie mają nic wspólnego ze wzmacniaczami audio. Jak wspomniałem, wzmacniacze klasy C stosowane są przede wszystkim w technice w.cz. Również tylko w technice w.cz. spotyka się wzmacniacze klas E, F, a ostatnio klasy M.

Klasa E. Zasada działania i przykład realizacji wzmacniacza klasy E przedstawiono na rys. 49. Element czynny pracuje tu jako klucz, który może być w jednym z dwóch stanów: otwarty, albo zamknięty. Kluczem jest zwykle tranzystor MOSFET. Taki klucz współpracuje z obwodem rezonansowym, który jest też filtrem. Filtrowy usuwa wyższe harmoniczne i pozwala uzyskać na wyjściu sygnał sinusoidalny.



Rys. 49.

Istotą klasy E jest taka realizacja wzmacniacza w.cz., żeby fazy przebiegów zmiennych prądu i napięcia w obwodzie z tranzystorem-kłuczem były odpowiednio przesunięte. Najprościej rzecz ujmując, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną, prąd osiąga wartość zero. I na odwrót: maksymalna wartość prądu oznacza zerowe napięcie. Właśnie takie przesunięcie fazy umożliwia optymalne przełączanie i uzyskanie bardzo wysokiej sprawności. Ale takie przesunięcie fazy można względnie łatwo zrealizować tylko dla jednej częstotliwości. Dlatego wzmacniacze mocy klasy E dostrojone są tylko do jednej częstotliwości pracy (częstotliwości pracy nadajnika radiowego), a ponadto generalnie nie mogą pracować jako wzmacniacze liniowe, choćby w systemach radiowych z modulacją SSB.

Klasa F obejmuje wzmacniacze rezonansowe wysokiej częstotliwości, pracujące podobne jak w klasie E, ale z obwodami rezonansowymi strojonymi nie na częstotliwość podstawową, tylko na jedną, dwie harmoniczne (lub np. podstawową i trzecią harmoniczną). W literaturze spotyka się angielskie określenia dotyczące wzmacniaczy klasy F, takie jak „biharmonic,” „polyharmonic,” „Class DC,” „single-ended Class D,” „High-efficiency Class C,” czy „multiresonator”, wskazujące na sposób działania. Różnica między klasami E i F dotyczy więc obwodów rezonansowych, a nie kąta przewodzenia klucza tranzystorowego. Przykładowy schemat wzmacniacza klasy F pokazano na rys. 50.

Klasa M. Działanie wzmacniaczy klasy M jest podobne do klasy E, przy czym w grę wchodzi wrażliwość na modulację PWM. O klasie M mówi się w związku z nowoczesnymi cyfrowymi scalonymi sterownikami przeznaczonymi do współczesnych systemów radiokomunikacyjnych.

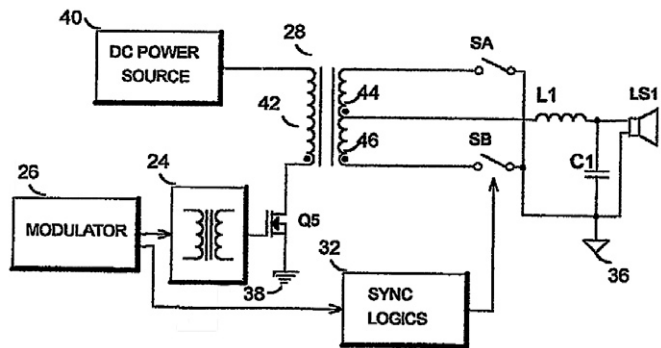
W zasadzie powinniśmy teraz przejść do kolejnej literki G, jednak dokończmy wcześniej temat klas wzmacniaczy w.cz.

Miłośnicy audio powinni zapamiętać tylko, że znane dotychczas wzmacniacze klas E, F, M na pewno nie leżą w kręgu ich zainteresowań. Nigdy nie służyły i nie będą służyć do wzmacniania sygnałów audio. Chyba, że ktoś wpadnie na pomysł, żeby literką E, F, M oznaczyć jakąś zupełnie nową klasę wzmacniaczy audio. Taka właśnie sytuacja jest z omówionymi dalej klasami J i N.

Klasa N

W roku 2002 przedstawiono koncepcję wzmacniacza wysokiej częstotliwości klasy N. Wysoka sprawność jest tam osiągana przez zmniejszenie mocy strat w tranzystorze wskutek przepływu „prądów pojemnościowych, które wytwarzają ujemne prądy kolektora”.

Zgłoszono też patenty na wzmacniacze audio klasy N. Są to najprawdziwsze wzmacniacze impulsowe. Zawierają modulator wytwarzający specyficzny przebieg PWM, sterujący kluczem-przełącznikiem, transformator impulsowy i detektor synchroniczny. Przykładowy schemat blokowy



Rys. 51.

wzmacniacza klasy N, pochodzący z dokumentu patentowego, pokazano na rys. 51.

W ofertach sieci sprzedaży wzmacniaczy samochodowych można też spotkać opisy, że chodzi o wzmacniacz klasy N, jednak nie jest to praktyczne wykorzystanie koncepcji przedstawionej na rys. 51, a jedynie chwyt reklamowy.

Klasa G

Przez ostatnie czterdzieści lat moc wyjściowa domowych wzmacniaczy mocy audio stale rośnie. Producenci wabią klientów coraz to większą mocą swych zestawów. Pomijając nieprzystojne chwytły reklamowe, polegające na podawaniu „wziętej z sufitu” niebotycznej mocy PMPO, trzeba przyznać, że wzmacniacze czołowych firm naprawdę mają zadziwiająco dużą moc wyjściową, rzędu kilkuset watów. Nawet za pomocą układów scalonych można zrealizować wzmacniacze klasy AB o mocy wyjściowej rzędu 100 W i więcej.

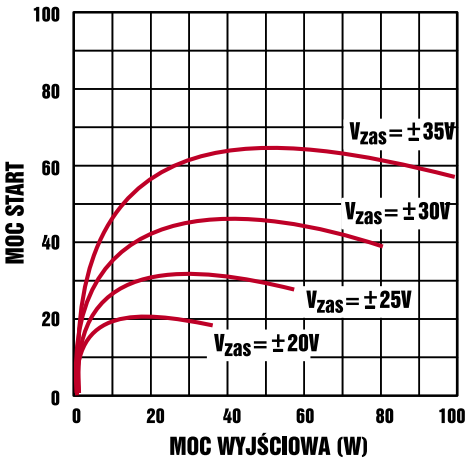
Co bardzo ważne, w klasycznych wzmacniaczach ze wzrostem mocy maksymalnej rośnie poważny problem mocy strat. Podawana w literaturze teoretyczna sprawność wzmacniacza klasy AB rzędu 65...75% dotyczy pełnegoysterowania. W praktyce problem polega też na tym, że przez zdecydowaną większość czasu pracy wzmacniacz audio pracuje z mocą dużo mniejszą od maksymalnej. Tymczasem okazuje się, że przy mniejszymysterowaniu moc strat jest większa(!) niż przy maksymalnym sygnale – pokazano to pochodzącym z karty katalogowej pewnego scalonego wzmacniacza rys. 52. Oczywiście oznacza to poważny spadek sprawności energetycznej. Zależność jest praktycznie taka sama dla wszystkich wzmacniaczy klasy AB, zarówno scalonych, jak i budowanych na elementach dyskretnych.

Na rys. 52 pokazano również, iż moc strat bardzo silnie zależy od napięcia zasilającego – mniejsze napięcie zasilania to wprawdzie mniejsza maksymalna moc wyjściowa, ale i mniejsza moc strat. W rzeczywistych sygnałach audio, zarówno mowy, jak i muzyki, przez większość czasu poziom sygnałów jest nie duży, a jedynie co jakiś czas występują silniejsze fragmenty. Tym samym przez większość czasu wzmacniacz pracuje w niekorzystnych warunkach, z dużą mocą strat.

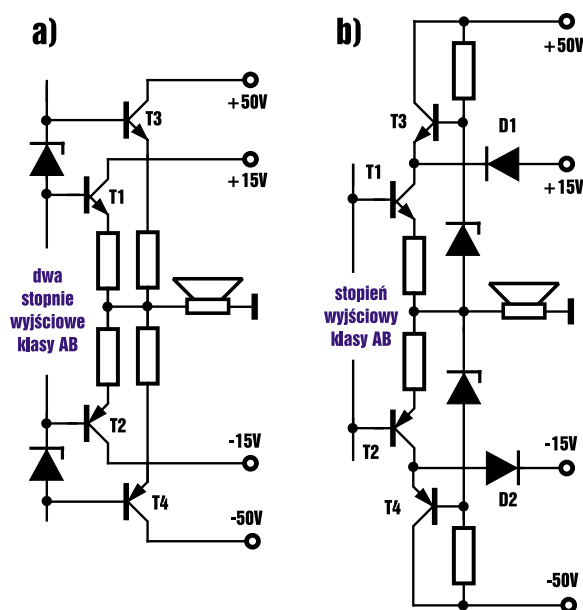
Logika podpowiada, że przez większość czasu pracy wystarczyłby wzmacniacz niewielkiej mocy (i malej mocy strat), a tylko w krótkich chwilach potrzebny byłby potężny wzmacniacz dysponujący pełną mocą. I tu zaczyna się historia klasy G.

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

Rozwiązań można byłoby wskazać kilka. Ponieważ jednak chodzi o napięcia, nie pomoże tu wspomniany wcześniej „chwyt”, nazywany klasą AB+B, gdzie analogiczna idea dotyczy prądów. Klasa AB+B nic nie pomaga, jeśli chodzi o kwestię redukcji całkowitej mocy strat. Idea klasy G polega na zwiększaniu napięcia zasilania, gdy przychodzi większy sygnał.



Rys. 52.



Rys. 53.

Sercem typowego wzmacniacza klasy G jest największy stopień wyjściowy pracujący w klasie AB. Dwa bardzo uproszczone przykłady realizacji wzmacniacza klasy G pokazano na rys. 53. Pierwszy zawiera dwa stopnie klasy AB, zasilane napięciami o różnej wartości. Przy małych sygnałach pracuje tylko część zasilana niższym napięciem (T1, T2). Dopiero duże sygnały sterujące otwierają tranzystory T3, T4.

W drugim rozwiązaniu (rys. 53b) występuje tylko jeden stopień wyjściowy klasy AB (T1, T2). Przy niewielkich sygnałach jest on zasilany 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 szczytach występowania uzyskać na obciążeniu potrzebną dużą moc. Można powiedzieć, że duże napięcie wyjściowe powoduje podwyższenie napięcia zasilania.

Wzmacniacz klasy G z rys. 53b może być zmodyfikowany wg rys. 54. Wtedy „zewnętrzne” tranzystory T3 i T4 nie są otwierane płynnie w takt sygnału, tylko pracują jako klucze: są albo w pełni otwarte, albo w pełni zatkane. W literaturze takie rozwiązanie nazywa się też *railswitcher*, co wskazuje, że chodzi o przełączanie napięć zasilania.

W podstawowej koncepcji z rys. 53, 54 występują dwie dodatkowe szyny zasilania. Koncepcja klasy G obejmuje też analogiczne rozwiązania z większą liczbą szyn zasilania, co z jednej strony pozwala zmniejszyć straty mocy, ale z drugiej strony poważnie komplikuje układ.

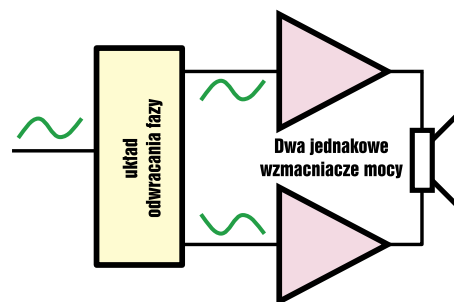
Jak wskazuje rys. 52, wzmacniacze klasy G umożliwiają znaczącą redukcję średniej mocy strat. I to jest ich istotna, ale jedyna zaleta – zniekształcenia nie są wcale mniejsze od zniekształceń analogicznych wzmacniaczy klasy AB.

Wzmacniacze klasy G pojawiły się na rynku pod koniec lat 70. (*Dynaharmony HMA 8300* – rok 1977). Ogólnie biorąc, wzmacniacze rozmaitych odmian klasy G są rzadko stosowane w sprzęcie domowym. Wcześniej były spotykane we wzmacniaczach profesjonalnych, ale obecnie są wypierane stamtąd przez nowocześniejsze rozwiązania.

Przed omówieniem klasy H koniecznie trzeba wspomnieć o skrócie BTL.

BTL

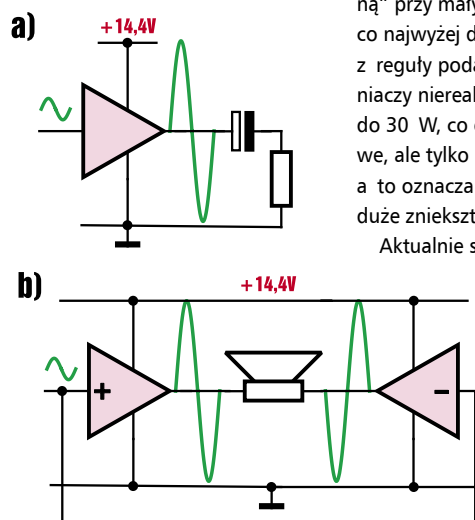
Nie jest to nazwa klasy wzmacniaczy, jak błędnie uważają niewtajemniczeni. BTL (*Bridge Tied Load*) oznacza po prostu układ mostkowy, a nie klasę wzmacniacza. Połączenie dwóch jakichkolwiek wzmacniaczy (np. klasy AB) oraz stopnia odwracającego fazę sygnału według rys. 55 pozwala uzyskać na obciążeniu moc czterokrotnie większą niż w przypadku pojedynczego wzmacniacza. Czterokrotnie, ponieważ przy danym obciążeniu dwukrotne zwiększenie napięcia wiąże się z dwukrotnym zwiększeniem prądu, a to oznacza właśnie czterokrotne zwiększenie mocy wyjściowej. Dodatkową zaletą jest brak kondensatorów wyjściowych. Często stosuje się rozwiązania uniwersalne, w których dwa kanały wzmacniacza mogą pracować oddzielnie, albo można je połączyć jako wzmacniacz BTL. Układy mostkowe BTL są stosowane przede wszystkim w urządzeniach samochodowych, zasilanych napięciem akumulatora, wynoszącym w czasie jazdy około 14,4 V, a także we wzmacniaczach dużej mocy (powyżej 100 W), zwłaszcza profesjonalnych.



Rys. 55.

Warto pamiętać, że klasyczny wzmacniacz samochodowy, zrealizowany według idei z rys. 56a może oddać do 4-omowego obciążenia moc „sinusoidalną” przy małych zniekształceniach co najwyżej do 6 W. Nawet przy przesterowaniu takiego wzmacniacza sygnałem prostokątnym moc wyjściowa sięgnie co najwyżej do 10...12 W, a przecież sygnał prostokątny oznacza nieakceptowalnie duże zniekształcenia.

W przypadku samochodowego wzmacniacza mostkowego z rys. 56b, amplituda sygnału na głośniku nie może przekroczyć 14,4 V, a w praktyce jest o 2...3 V mniejsza z uwagi na napięcia nasycenia tranzystorów wyjściowych. Wobec tego wartość skuteczna przebiegu sinusoidalnego na pewno jest mniejsza od 10 V. Aby obliczyć maksymalną „sinusoidalną” moc wyjściową, wystarczy skorzystać ze wzoru: $P = (U_{sk})^2 / R$. Teoretycznie przy napięciu wyjściowym o wartości skutecznej 10 V moc wyniosłaby 25 W. W praktyce z uwagi na napięcia nasycenia, wzmacniacz samochodowy BTL według koncepcji z rys. 56b pozwala uzyskać moc „sinusoidalną” przy małych zniekształceniach co najwyżej do 22 W. Producenci z reguły podają dla takich wzmacniaczy nierealną moc wyjściową 24 do 30 W, co owszem, jest możliwe, ale tylko przy przesterowaniu, a to oznacza nieakceptowalnie duże zniekształcenia.



Rys. 56.

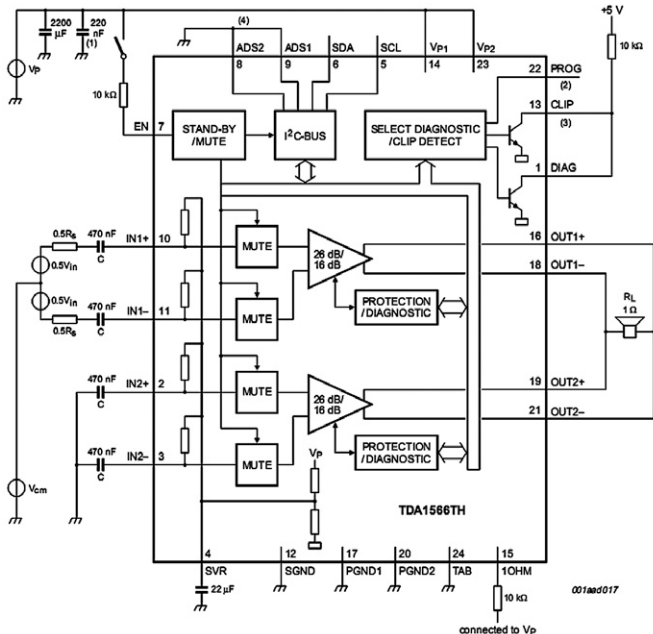
Aktualnie scalone wzmacniacze

samochodowe BTL pozwalają na najprostszą realizację wzmacniaczy audio o dość dużej mocy wyjściowej. Oprócz układu scalonego wystarczy dosłownie kilka popularnych



Rys. 57.

mostkowy BTL przy napięciu zasilania 14,4 V umożliwia uzyskanie mocy „sinusoidalnej” co najwyżej do 12 W na obciążeniu 8 Ω i 22 W na 4 Ω. Ponieważ w wielu wypadkach to nie wystarcza, stosowane są różne sposoby uzyskania większej mocy. Najprostsze jest zmniejszenie oporności obciążenia do 2 Ω co umożliwia uzyskanie ponad 40 W mocy. Dostępne są scalone wzmacniacze samochodowe, mogące pracować z obciążeniem 2 Ω, jednak głośniki o oporności 2 Ω nie są popularne. Można dołączyć do takiego wzmacniacza dwa 4-omowe głośniki połączone równolegle, ale jeśli tak, to taniej jest wykorzystać dwa popularne wzmacniacze BTL, po jednym dla każdego głośnika. Pojawili się też mostkowe wzmacniacze samochodowe, mogące pracować z obciążeniem 1 Ω, co umożliwia dalsze zwiększenie mocy. Na rys. 58 pokazano układ aplikacyjny układu



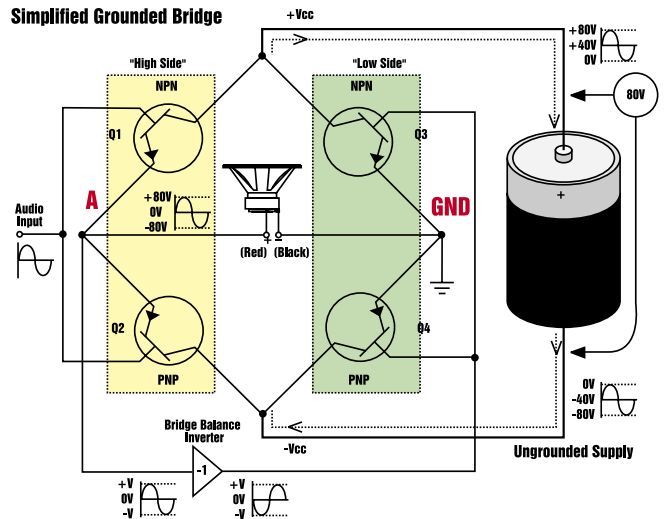
Rys. 58.

TDA1566 firmy NXP (Philips). Według opisu przy zasilaniu „napięciem samochodowym” 14,4 V pozwala on uzyskać 2x46 W na obciążeniu 2 Ω i imponujące 92 W na 1 Ω w konfiguracji mono. Warto zauważyć, że w przedstawionej konfiguracji mono dwa wzmacniacze mostkowe połączone są niejako równolegle. Generalnie wyjść wzmacniaczy, ani zwykłych, ani mostkowych BTL nie można łączyć równolegle. Mamy tu rzadki przypadek i możliwości wynikające ze specyficznej budowy wzmacniacza (innym przykładem możliwości łączenia wyjść jest „pojedynczy” wzmacniacz TDA7293).
Należy podkreślić, że konfigurację BTL stosuje się głównie do zwiększenia mocy wyjściowej wzmacniaczy samochodowych. Innym, dość często stosowanym sposobem uzyskania większej mocy jest zastosowanie przetwornicy, czyli zasilacza impulsowego, podwyższającego napięcie

z 14,4 V do np. ±25 V lub wyższego oraz klasycznego wzmacniacza, pojedynczego lub mostkowego BTL, który przy tak podwyższonym napięciu zasilania da dużą moc.
Jeszcze innym sposobem zwiększenia mocy wyjściowej i zwiększenia sprawności energetycznej jest zastosowanie wzmacniacza klasy H. Zanim jednak przejdziemy do jej omawiania, należy wspomnieć o idei uziemionego mostka.

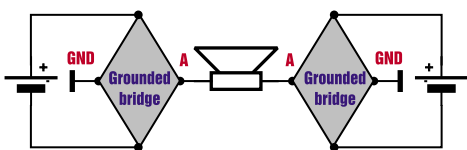
Grounded bridge, czyli uziemiony mostek

Tylko na pozór idea uziemionego mostka, pokazana na pochodzącym z materiałów firmy CROWN rys. 59, jest identyczna ze wzmacniaczem mostkowym BTL. Istotnie, moc wyjściowa jest taka, jak w przypadku wzmacniacza mostkowego – międzyszczytowa amplituda przebiegu na głośniku jest praktycznie dwa razy większa od napięcia zasilania. Okazuje się jednak, że wcale nie jest to to samo. Zwróćmy uwagę, że nie są to dwa jednakowe wzmacniacze sterowane sygnałami o przeciwnej fazie. Można byłoby powiedzieć w uproszczeniu, że „najpierw” sterowana jest jedna para tranzystorów (kolor żółty na rys. 59), a dopiero „później” zmiana napięcia w punkcie A podawana jest na wzmacniacz, a właściwie inwerter o wzmacnieniu -1 i dalej na pomocniczą parę tranzystorów (kolor zielony), przy czym punkt B jest uziemiony. Dla uproszczenia i jasnego pokazania idei, na rys. 59 bazy par tranzystorów są połączone. W rzeczywistości tranzystory te są stopniami wyjściowymi klasycznych wzmacniaczy klasy AB.



Rys. 59.

Na pozór drobna różnica w stosunku do wzmacniacza BTL, a mianowicie uziemienie jednego z punktów przekątnej mostka, ma ważne skutki praktyczne. Mianowicie punktem odniesienia, masą, jest jeden z zacisków głośnika, natomiast źródło (pojedynczego) napięcia zasilania nie może być uziemione, ponieważ podczas pracy wzmacniacza „pływa” w takt sygnału. Wydawałoby się, że sprawa uziemienia, a ściślej dołączenia do masy, nie ma wielkiego znaczenia. Okazuje się jednak, że jest to korzystne z kilku powodów. Na przykład nie można połączyć w mostek BTL dwóch układów BTL, natomiast można połączyć w jeden układ mostkowy dwa takie dziwne wzmacniacze „z uziemionym mostkiem” i włączyć głośnik między punkty A obu wzmacniaczy (rys. 60). Oba wzmacniacze składowe koniecznie muszą być wtedy zasilane z niezależnych źródeł, oddzielonych galwanicznie. Wtedy maksymalna amplituda sygnału w takim



Rys. 60.

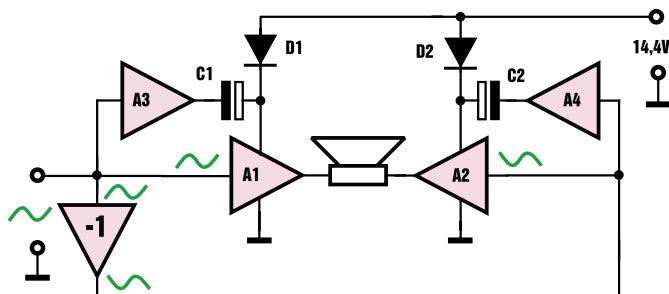
nietypowym wzmacniaczu mostkowym zawierającym dwa uziemione mostki, będzie niemal równa sumie napięć zasilania obu wzmacniaczy. A międzyszczytowa amplituda sygnału wyjściowego będzie prawie dwa razy większa od sumy napięć zasilania $U_1 + U_2$.

Tu trzeba dodać, że opisane sposoby, ani układ BTL, ani uziemiony mostek, nie zwiększają sprawności energetycznej wzmacniacza, ani nie prowadzą do redukcji zniekształceń – nadal są to wzmacniacze klasy AB.

Klasa H

Wzmacniacz klasy H jest modyfikacją, a raczej bardzo interesującym rozwinięciem koncepcji wzmacniacza klasy G. O ile we wzmacniaczu klasy G zależnie od wielkości sygnału zmieniane jest „zewnętrzne” napięcie zasilania, o tyle wzmacniacz klasy H przy większych sygnałach sam sobie wytwarza zwiększone napięcie zasilania. Koncepcja wzmacniacza klasy H pojawiła się we wczesnych latach 60., a pierwsze wzmacniacze tej klasy pojawiły się w drugiej połowie lat 70. Wzmacniacze klasy H są stosowane głównie jako wzmacniacze samochodowe, zasilane napięciem 14,4 V.

Uproszczony schemat blokowy wzmacniacza klasy H pokazano na rys. 61. Podstawą jest tu układ mostkowy (wzmacniacze A1, A2). Normalnie jest on zasilany napięciem akumulatora przez diody D1, D2 i pracuje jak najzwyklejszy wzmacniacz BTL 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 zasilające jest zwiększane w takt sygnału tylko w tym kanale i tylko wtedy, gdy jest to konieczne.

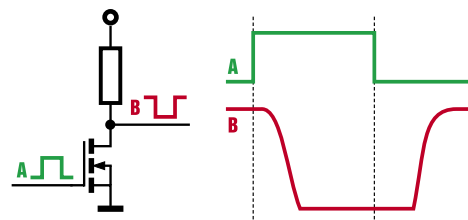


Rys. 61.

Oprócz zwiększenia mocy wyjściowej, praca przy zmieniającym się dynamicznie napięciu zasilania niejako przy okazji daje poprawę sprawności energetycznej, co umożliwia zastosowanie mniejszego radiatora. Przykładem praktycznej realizacji może być układ scalony Philipsa TDA1562Q, umożliwiający przy napięciu akumulatora 14,4 V uzyskanie mocy 70 W na obciążeniu 4 Ω (100 W w szczycie przy zasilaniu 17 V). Na rys. 61 pokazano uproszczony schemat tego właśnie wzmacniacza.

Klasa I

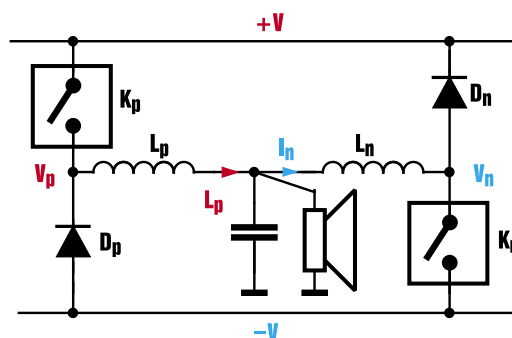
Klasa I to specyficzna odmiana klasy D. W klasycznych wzmacniaczach klasy D podstawą jest stopień wyjściowy, złożony z dwóch tranzystorów MOSFET. Teoria jest prosta: w dowolnym momencie jeden z tranzystorów jest otwarty, drugi zamknięty. Ani przez chwilę nie można dopuścić do tego, żeby jednocześnie były włączone oba tranzystory, bo oznaczałoby to przepływ ogromnego prądu i inne katastrofalne zjawiska. Tylko w teorii jeden tranzystor zamyka się dokładnie w momencie, gdy ten drugi się otwiera. W praktyce nie jest to takie oczywiste. Tranzystory MOSFET mają znaczną pojemność bramki, a dodatkowo w grę wchodzi inne mechanizmy spowalniające pracę. W rzeczywistości proces przełączania tranzystora jest opóźniony i trwa pewien czas rzędu kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu nanosekund (rys. 62). Nie jest to wcale bardzo krótki czas, jeśli wziąć pod uwagę wymagane częstotliwości przełączania, które wynoszą od 100 kHz do kilku megaherców. Aby uzyskać optymalne parametry,



Rys. 62.

należałoby bardzo starannie sterować procesem przełączania tranzystorów. Problem jednak także w tym, że nawet poszczególne egzemplarze tranzystorów mogą różnić się czasami opóźnienia i przełączania, więc zrealizowanie optymalnego sterowania staje się bardzo skomplikowane. Każdy z dwóch tranzystorów należałoby otwierać i zamykać z indywidualnie dobranym opóźnieniem. Każda niedokładność wpływa na parametry, co jest bardzo ważne, gdy chodzi o uzyskanie we wzmacniaczu klasy D znikomych zniekształceń rzędu drobnych ułamków procenta, wymaganych w wysokiej klasy wzmacniaczach.

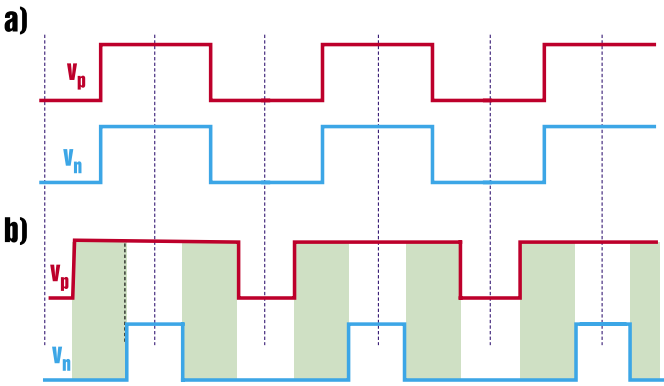
Koncepcja klasy I jest interesującą próbą ominięcia problemu nieidealnych parametrów MOSFET-ów pracujących w roli przełączników. Można powiedzieć, że wspomniane niedoskonałości przełączania nie zostają wcale usunięte, tylko skompensowane. Wzmacniacz klasy I składa się jakby z dwóch niedoskonałych części, ale co ważne, mających jednakowe parametry, jeśli chodzi o opóźnienia. Nie jest to jednak odmiana wzmacniacza mostkowego BTL, choć pewnych podobieństw można byłoby się dopatrywać. Jest to niewątpliwie odmiana wzmacniacza klasy D. Inaczej mówiąc, są to dwa specyficzne przetworniki PWM, pracujące na wspólne obciążenie. Uproszczony schemat wzmacniacza klasy I pokazany jest na rys. 63. Dwa klucze (tranzystory MOSFET) są sterowane dwoma przebiegami prostokątnymi o dużej częstotliwości. Nietrudno zauważyć, że klucz K_p będzie dostarczał do obciążenia „prąd dodatni” I_p , a klucz K_n – „prąd ujemny” I_n . Główna idea jest w sumie prosta: działanie polega na sumowaniu, a właściwie odejmowaniu prądów I_p i I_n . Na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że prądy I_p i I_n są jednokierunkowe. Tak byłoby, gdyby nie było cewek. Obecność cewek, które „nie lubią gwałtownych zmian prądu i przy zmianie prądu wytwarzają napięcie samoindukcji” oraz obecność dwóch diod D_p i D_n powodują, że prądy I_p i I_n w rzeczywistości są dwukierunkowe i mają kształt trójkątny.



Rys. 63.

W spoczynku, bez sygnału, przebiegi prostokątne sterujące kluczami K_p i K_n są dokładnie takie same (rys. 64a). W punktach V_p , V_n występują przebiegi prostokątne nieco zniekształcone przez niedoskonałe przełączniki, ale można powiedzieć, że są one jednakowe. W każdym razie średnia wartość różnicy prądów $I_p - I_n$ jest równa zero i napięcie na głośniku też jest równe zero. Stąd zresztą pochodzi inna nazwa klasy I, a mianowicie skrót BCA (Balanced Current Amplifier). Ma to też związek z nazwą klasy – litera I pochodzi od *interleave*, co można przetłumaczyć jako przeplatanie.

Gdy wzmacniacz klasy I zostajeysterowany sygnałem wejściowym, wtedy zmieniają się współczynniki wypełnienia przebiegów w punktach V_p i V_n . Zmieniają się „w przeciwnych kierunkach”. To znaczy, że jeśli

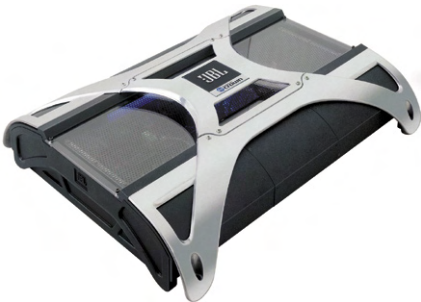


Rys. 64.

wypełnienie sygnału w punkcie Vp rośnie, to w punkcie Vn – maleje (rys. 64b). To znaczy, że impulsowy prąd Vp rośnie, a prąd In – maleje. Różnica tych prądów przepływa przez głośnik. Dodatkową zaletą jest to, że pojawiające się „impulsy różnicowe”, zaznaczone na rysunku 64b kolorem zielonym, mają częstotliwość dwa razy większą od przebiegu takującego, co jest korzystne z uwagi na mniejsze straty przełączania oraz łatwiejsze odfiltrowanie przebiegu audio. Wgłębianie się w szczegóły, nie jest konieczne, a więcej informacji o klasie I (BCA) można znaleźć na stronie www.crownaudio.com



Fot. 65.



Fot. 66.

Omówiona zasada pracy jest wykorzystywana w niektórych wzmacniaczach Crown, choćby z serii I-Tech, pokazanych na fot. 65, natomiast na fot. 66 przedstawiono przeznaczony do subwoofera samochodowy wzmacniacz klasy I typu A6000GTi siostrzanej firmy JBL. Przy zasilaniu 14,4 V daje porażające moce wyjściowe do 8 kW i oczywiście pobiera wtedy niewyobrażalnie duży prąd, do 760 A. Niektóre parametry tego impulsowego wzmacniacza podane są poniżej:

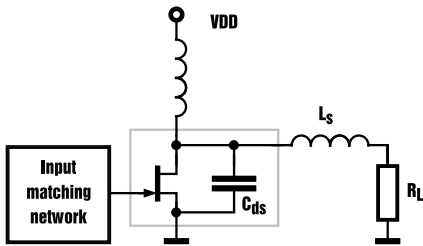
Output power @1% THD 100 Hz 14,4 volts	
Dual Mono Configuration	
8 Ω x 2 channels	2 x 1600 W
4 Ω x 2 channels	2 x 2800 W
2 Ω x 2 channels	2 x 4150 W
Parallel Configuration	
2 Ω x 1 channel	1 x 5,300 W
1 Ω x 1 channel	1 x 7,700 W
Bridged Configuration	
4 Ω x 1 channel	1 x 8200 W (760 A)

Distortion (100 Hz, 6000 W)	0,043% @ 2 W
Frequency response (±1 dB)	17 Hz...50 Hz
S/N (A-weighted, below clipping)	96 dB
Damping Factor @ 100 Hz, 4 Ω	102
Idle current	2,2 amps
Slew rate	13 V/μs
Standby current	65 mA
Efficiency at full power, 4 Ω/ Ch	85%
Efficiency at full power, 2 Ω/ Ch	76%
Maximum current consumption	760 A

Wzmacniacze klasy I (BCA), pomimo poprawionych parametrów, nie okazały się zwalającą z nóg rewelacją i nie wyparły klasycznych wzmacniaczy klasy D.

Klasa J

Z klasą J jest trochę zamieszania. Na pewno określenie klasa J dotyczy wzmacniaczy pracujących przy wysokiej i bardzo wysokiej częstotliwości (nawet rzędu dziesiątek GHz). Jest odmianą klasy E, gdzie wykorzystuje się wbudowaną pojemność wewnętrzną tranzystora. Schemat wzmacniacza w.cz. klasy J pokazano na rys. 67.

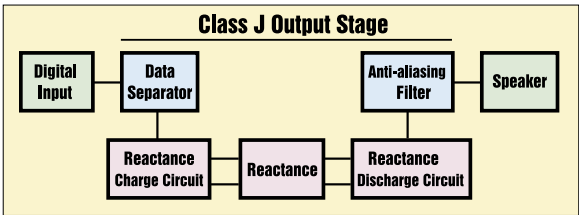


Rys. 67.

W Internecie (www.rane.com) można też spotkać opinię, że klasa J została zaproponowana dla wzmacniaczy, które są połączeniem wzmacniaczy klas B oraz D, pracujących na wspólne obciążenie. Takie działanie jest też nazywane klasą K oraz klasą AD.

Określenie klasa J pojawiło się też w roku 2000 w propozycji amerykańskiej firmy JAM Technologies LLC. Szczegóły proponowanych wzmacniaczy REVAT True Fidelity zostały okryte tajemnicą. W ówczesnych materiałach podane były jedynie ogólnikowe informacje, że chodzi o „całkowicie cyfrową technologię wzmacniaczy audio”, gdzie można uzyskać napięcia wyjściowe 3...4-krotnie wyższe od napięcia zasilania, a to dzięki zastosowaniu elementów reaktancyjnych, ładowanych i rozładowywanych przez klucze, sterowane sygnałami PWM. Schemat blokowy wzmacniacza klasy J wyglądał jak na rys. 68. Wzmacniacze takie miały być stosowane głównie w sprzęcie komputerowym. Takie szcątkowe informacje można znaleźć w pliku umieszczonym pod adresem:

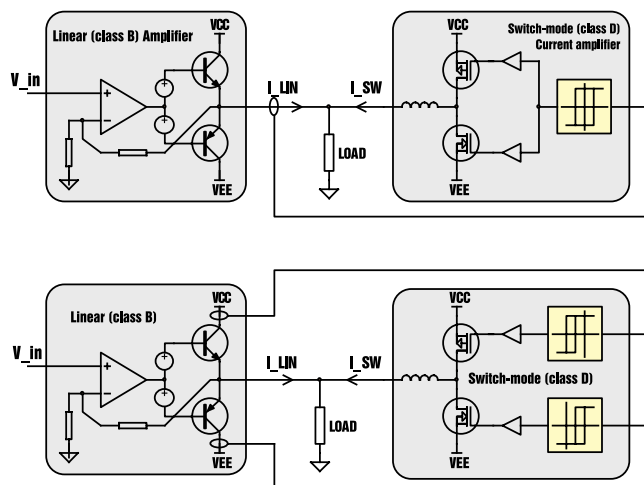
http://3dsoundsurge.com/downloads/Class_J_Digital_Amplification.zip
Witryna firmy JAM Technologies LLC (www.jam-tech.com) jest obecnie nieczynna, co wskazuje na fiasco przedsięwzięcia.



Rys. 68.

Klasa K, SMALA

W roku 1998 na pewnej konferencji trzech Koreańczyków z seulskiego Instytutu Naukowo-Technologicznego zaprezentowało koncepcję wzmacniacza klasy K. Według opisu ma to być wzmacniacz audio, który połączy zalety wzmacniaczy cyfrowych (w domyśle: klasy D) i analogowych.



Rys. 69.

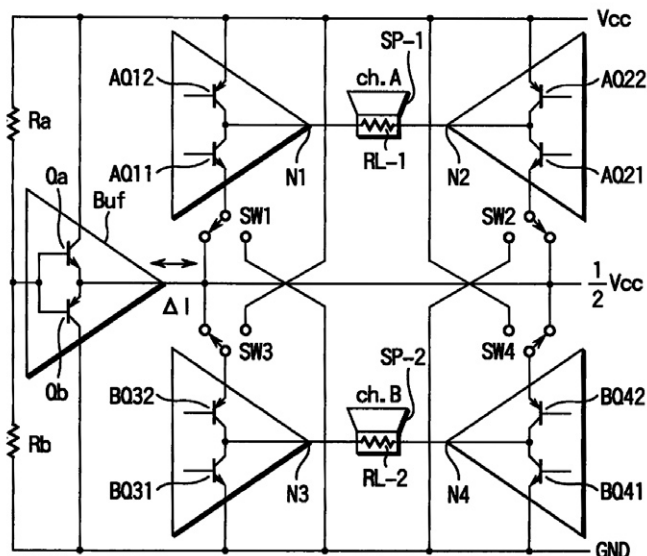
Wysoka sprawność rzędu 90% ma zostać zapewniona przez wzmacniacz impulsowy, który pełni rolę zależnego źródła prądowego, natomiast wysokie parametry (zniekształcenia rzędu 0,005%) zapewni wzmacniacz analogowy, będący niezależnym źródłem prądowym.

W literaturze można znaleźć pokrewne lub identyczne koncepcje pod innymi nazwami, na przykład SMALA (Switch Mode Assisted Linear Amplifier) – rys. 69 pokazuje dwie spośród kilku topologii SMALA (same stopnie mocy, bez obwodów sprzężenia zwrotnego). Oba wzmacniacze mają w istocie wyjścia prądowe, a wzmacniacz analogowy pilnuje kształtu sygnału wyjściowego i dodając lub odejmując nieco prądu eliminuje niedoskonałości sygnału dostarczanego z części cyfrowej.

Koncepcja „równoległego” połączenia wzmacniacza analogowego i impulsowego klasy D nazywana jest też klasą AD.

Klasa KB

Opatentowana, ale raczej nie wykorzystywana klasa KB przypomina nieco działanie klas G oraz H. Nazwa pochodzi od Keyed class-B, albo od Keyed BTL i wskazuje na kluczowanie (zasilania) wzmacniacza. Podstawowym celem jest zmniejszenie mocy strat. Przy małych sygnałach klasyczne wzmacniacze mostkowe klasy AB zasilane są w pewnym sensie szerego-



Rys. 70.

R E K L A M A

... z nami WSZYSTKO GRA

UKŁADY AUDIO/VIDEO

- Wzmacniacze, przełączniki, filtry, przetworniki
- Zintegrowane nadajniki/odbiorniki/tunery FM
- Zintegrowane odbiorniki/tunery satelitarne
- Inne specjalizowane układy analogowe i „mixed-signal”

SILICON LABS

MAXIM

WG

Electronics

WG Electronics Sp. z o.o.

ul. Modzelewskiego 35

02-679 Warszawa

tel. +48 22 847 97 20

www.wg.com.pl

AUTORYZOWANY DYSTRYBUTOR

wo. W przypadku dwóch wzmacniaczy napięcie każdego z nich jest równe połowie całkowitego napięcia zasilania. W chwilach, gdy pojawia się silniejszy sygnał, obwody zasilania zostają przełączone i oba wzmacniacze są zasilane pełnym napięciem. Ideę wzmacniacza klasy KB pokazano na rys. 70, pochodzącym z dokumentu patentowego. Według pomysłodawców, możliwe jest analogiczne połączenie „w szereg” obwodów nie dwóch, tylko większej liczby wzmacniaczy.

Sprawność tak uzyskanego systemu jest lepsza niż wzmacniaczy klasy AB, zwłaszcza, gdy przetwarzane są sygnały stereo o podobnej zawartości. Wadą jest konieczność stosowania szybkich przełączników – kluczy o dobrych parametrach statycznych i dynamicznych. Prezentowana koncepcja jest praktycznie wykorzystywana, w przeciwieństwie do nieco podobnego rozwiązania, nazywanego klasą SB.

Klasa SB

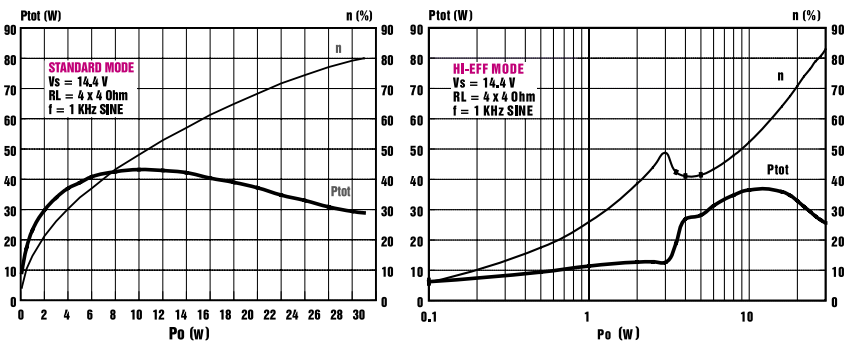
Klasa SB ma elementy wspólne z klasami G, H oraz KB. Idea klasy SB jest prosta: przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje jako pojedynczy (*single ended*), natomiast pojawienie się dużego sygnału momentalnie przełącza go i zamienia we wzmacniacz mostkowy BTL. Rozwiązanie to

zostało przedstawione przez ST-Thomson i zrealizowane choćby w postaci samochodowego wzmacniacza TDA7564B. Na rys. 71 pokazano sprawność i moc strat tego wzmacniacza pracującego w trybie standardowym (klasa AB) i w energooszczędnym HI-EFF (klasa SB). Wzmacniacze samochodowe oparte na tej energooszczędnej koncepcji produkuje też Philips. Przykładami są choćby TDA1563Q czy nowszy TDA1565TH, którego schemat aplikacyjny wraz z uproszczonym schematem wewnętrznym pokazany jest na rys. 72.

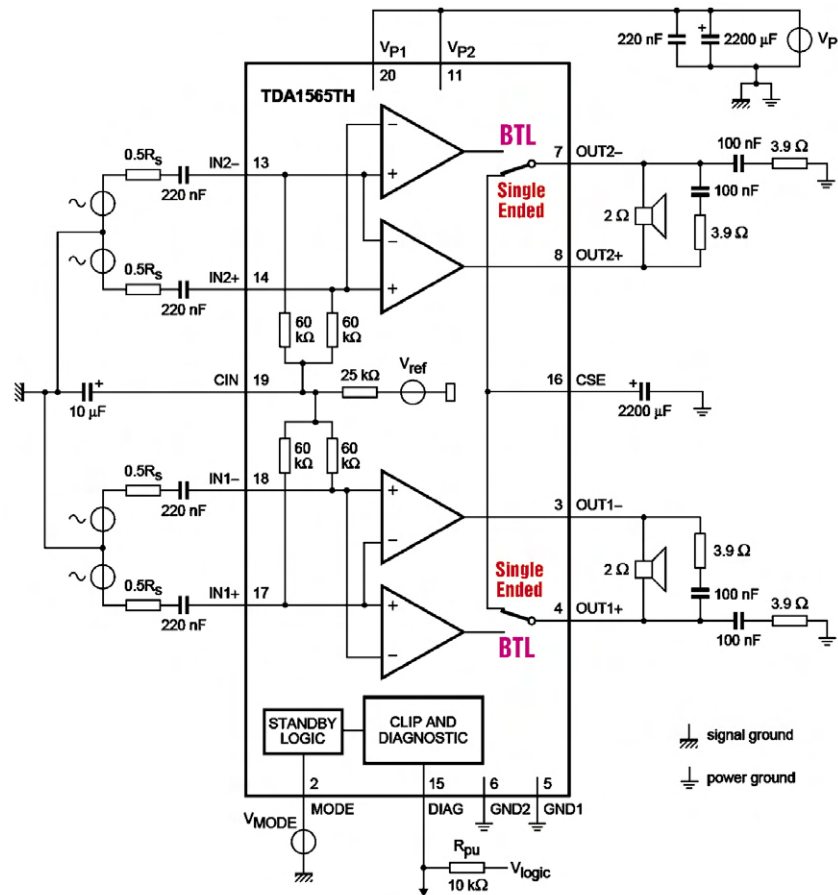
Klasa L

Z klasą L jest podobnie, jak z klasą J. Istnieją „radiowe” wzmacniacze mocy klasy K przeznaczone do bezpośredniego sterowania anten typu dipol lub innych obciążeń symetrycznych. Jedną połówką wzmacniacza steruje jedną częścią dipola, druga – drugą, według idei z rys. 73. Przypomina to pracę wzmacniacza mostkowego BTL, tylko w zakresie wysokich częstotliwości.

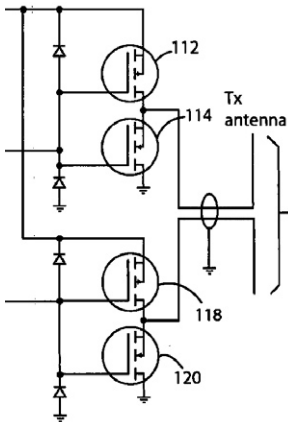
Jeśli chodzi o wzmacniacze audio klasy L, lakoniczne wzmianki w literaturze wskazują, że chodzi o odmianę wzmacniacza klasy KB, gdzie dla zmniejszenia mocy strat elektroniczne klucze – przełączniki, dynamicznie



Rys. 71.



Rys. 72.



Rys. 73.

wyбираją kombinację spośród kilku napięć (szyn) zasilania, stosownie do wielkości wzmacnianego sygnału oraz że dwa wzmacniacze klasy L mogą pracować w układzie mostkowym.

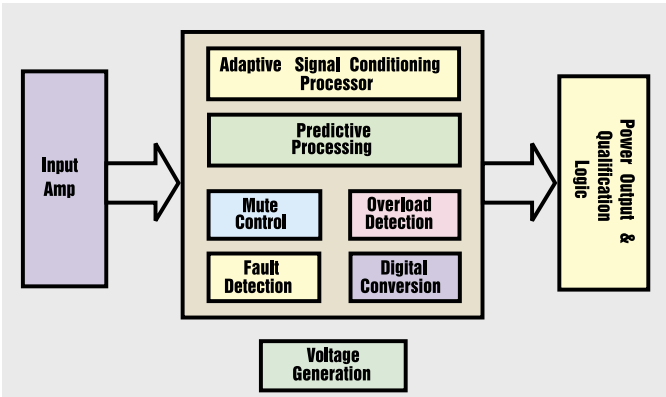
Klasa BD

Wiadomości o klasie BD też są bardzo skąpe. Niewątpliwie chodzi o zastrzeżenia patentowe z roku 1971 (Herbert, Walker) i późniejsze z przełomu wieków, zgłoszone przez firmę Rockford Corporation, stosowane we wzmacniaczach Fosgate jako technologia STARDUST (Single Terminal Alternating Rail Dual Sampling Topology). Patenty te związane są z ulepszeniem klasy D i mają na celu poprawę parametrów, zwłaszcza minimalizację zniekształceń. Lakoniczny opis technologii STARDUST na stronach firmy (www.rockfordfosgate.com) wskazuje, że chodzi o rozwiązanie pokrewne z klasą I (BCA) firmy Crown.

Klasa T

Przez kilka ostatnich lat w całej prasie elektronicznej można było znaleźć wiele wzmianek o wzmacniaczach klasy T. W roku 1998 amerykańska firma Tripath (TriPath) zaprezentowała pierwszy opracowany przez siebie wzmacniacz klasy T. Szybko wprowadzała moduły o coraz większej mocy, rzędu 1000 W.

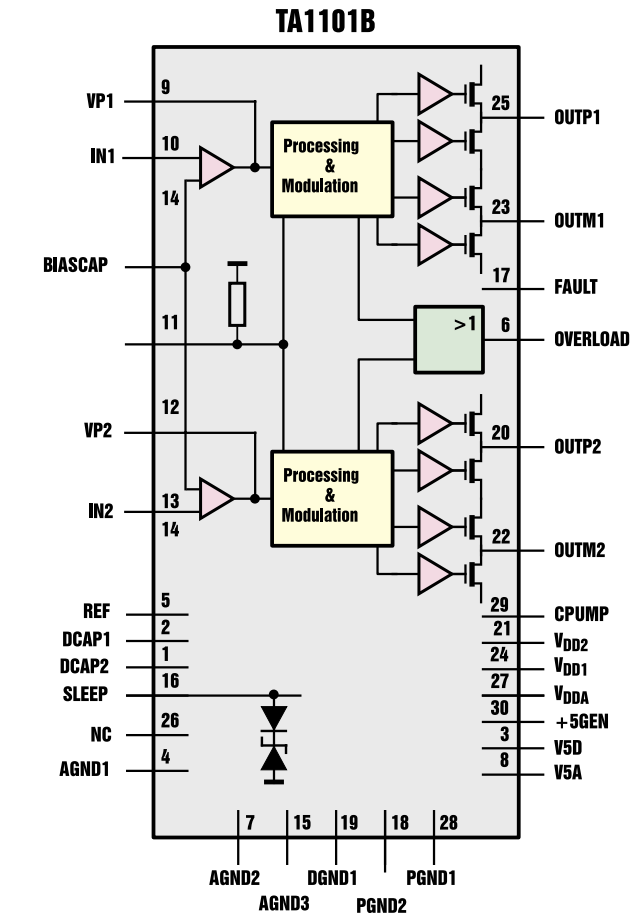
Ze względów komercyjnych firma Tripath nie wyjawiała wszystkich szczegółów dotyczących swych



Rys. 74.

wzmacniaczy. Wiadomo tylko, że chodzi o 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 50 kHz...1,5 MHz, wynosząc średnio 600...700 kHz.

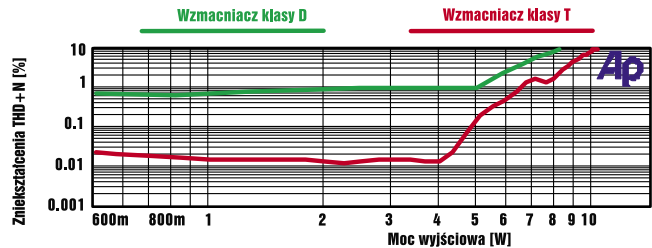
Nieporównanie bardziej skomplikowane są też stopnie sterujące. Częstotliwość i wypełnienie impulsów wyjściowych są wyznaczane przez skomplikowany proces cyfrowej obróbki z wykorzystaniem zaawansowanej teorii sygnałów, stosowanej wcześniej w telekomunikacji. Na rys. 74 i 75 pokazano wewnętrzne schematy 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 skomplikowanego algorytmu. Podstawą jest tu opracowana przez Tripath tak zwana technologia DPP™ (Digital Power Processing), łącząca osiągnięcia cyfrowej obróbki sygnałów i techniki sterowników dużej mocy.



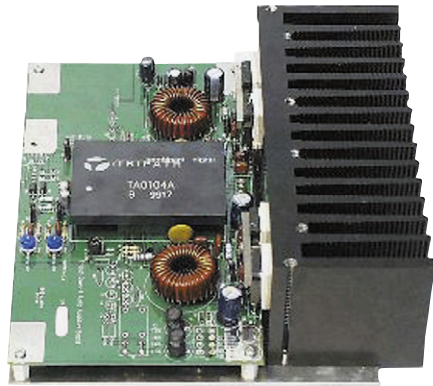
Rys. 75.

O ile „klasycznych” wzmacniaczy klasy D nie można nazwać wzmacniaczami cyfrowymi, miano takie mogłyby nosić wzmacniacze Tripath.

Efektom zastosowania we wzmacniaczu klasy T 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. Jedną z głównych przyczyn występowania zniekształceń we wzmacniaczach klasy D jest niedoskonałość i rozrzut parametrów wyjściowych tranzystorów MOSFET. Według zapewnień producenta, sterownik wzmacniacza klasy T niejako „uczy się” parametrów współpracujących tranzystorów (opóźnienie, charakterystyka przełączania, różnice parametrów) i potem kompensuje ich niedoskonałości wytwarzając odpowiednie impulsy sterujące. W efekcie 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. Na rys. 76 pokazano zmierzone współczynniki zniekształceń nieliniowych wzmacniaczy T i D o podobnej mocy. Dzięki pracy impulsowej, sprawność energetyczna jest niewiele gorsza, od sprawności „klasycznych” wzmacniaczy klasy D i wynosi 80...92%. Tym samym klasa T łączy zalety klas A, AB i D. Na fot. 77 przedstawiono zadziwiająco mały wzmacniacz TA0104A klasy T o mocy 2x500 W (1500 W w połączeniu mostkowym).



Rys. 76.

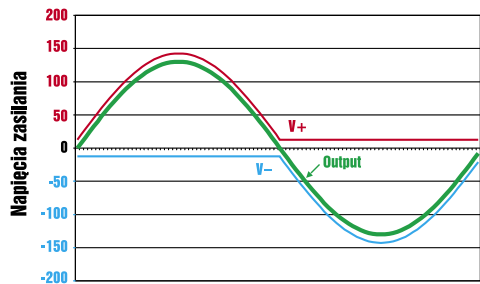


Fot. 77.

Czas pokazał, że nie tylko wzmacniacze klasy T w ciągu dziesięciu lat swego istnienia nie zdominowały rynku, ale nawet nie znalazły na nim znaczącej pozycji. W lutym 2007 roku firma Tripath ogłosiła upadłość i została przejęta przez Cirrus Logic. Nie znaczy to, że idea zaawansowanego cyfrowego przetwarzania sygnału umarła. Zastosowanie coraz szybszych układów DSP jest przyszłością wzmacniaczy mocy audio. Żywym przykładem jest omówiona dalej klasa Z.

Klasa TD

Klasa TD to „handlowa” klasa stosowana we wzmacniaczach firmy Lab. gruppen. Skrót TD pochodzi od *tracking class D*, gdzie słowo tracking odnosi się do śledzenia wartości sygnału przez napięcia zasilające. Firmowy opis wskazuje, że właściwy wzmacniacz pracuje w klasie AB i sygnał nigdy nie jest zamieniany na ciąg impulsów PWM, więc wbrew nazwie, niewątpliwie chodzi tu o wzmacniacz klasy AB, a nie wzmacniacz klasy D. Można ewentualnie powiedzieć, że z klasy D wzięta została idea wytwarzania przebiegu z ciągu impulsów. Tylko w omawianych wzmacniaczach, te impulsy dają nie przebieg wyjściowy, lecz... napięcie zasilające, zmieniające się w takt sygnału wejściowego. Dodatnie i ujemne napięcia



Rys. 78.

zasilania są dynamicznie podwyższane, stosownie do wielkości sygnału. Na rys. 78 pokazano, jak zmieniają się napięcia zasilające wzmacniacz klasy D. Jak widać, ważną rolę odgrywa tu precyzyjnie sterowany zasilacz impulsowy *R.SMPS™ – Regulated Switch Mode Power Supply*. I tylko ten regulowany impulsowy wzmacniacz swym działaniem nawiązuje trochę do klasy D.

Klasa V

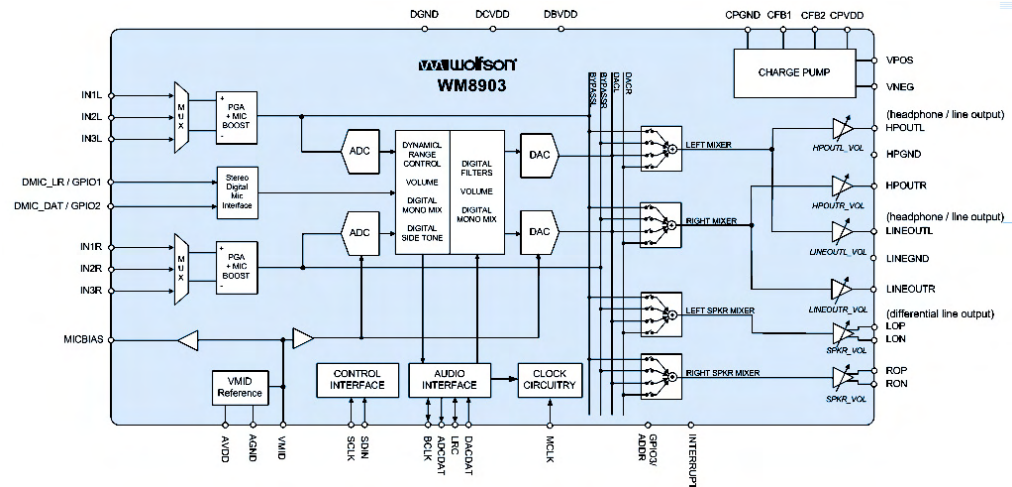
Kolejna „klasa handlowa” to klasa V, wykorzystywana przez Linn Technologies. Podobnie jak w przypadku TD, wzmacniacz klasy V zawiera klasyczny analogowy wzmacniacz oraz szybki zasilacz impulsowy, a do tego wykorzystuje się cyfrowe przetwarzanie sygnału. Dobre parametry zapewnia wzmacniacz klasy A, natomiast dużą moc można uzyskać przez redukcję strat, wynikająca z inteligentnego sterowania zasilaniem. Na fot. 79 pokazano wnętrze pięciokanałowego wzmacniacza AV-5125. Firma nie podaje szczegółów technicznych, a jedynie podkreśla zalety swych konstrukcji.



Fot. 79.

Klasa W

Klasa W to także klasa typowo handlowa, a być może też nazwa ma podtekst ambicjonalny. Otóż brytyjska firma Wolfson, wyrastająca na poważnego dostawcę zaawansowanych układów scalonych do urządzeń przenośnych, ogłosiła niedawno, że w swoim ultraszczędnym koduku WM8903 zrealizowała między innymi wzmacniacz słuchawkowy klasy W.



Rys. 80.

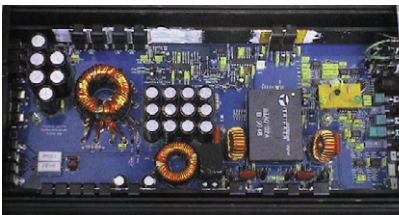
W sumie cały kodek, którego uproszczony schemat blokowy pokazano na rys. 80, rzeczywiście pobiera zaskakująco mało energii. W przypadku wzmacniacza klasy W nie chodzi o wzmacniacz dużej mocy, tylko o wzmacniacz słuchawkowy, zasilany napięciem rzędu 3 V. Generalnie wzmacniacze słuchawkowe pracują w klasie AB i występujące w nich moce strat są rzędu kilkunastu, do co najwyżej kilkuset miliwatów. Projektanci Wolfsona postanowili zminimalizować straty mocy wzmacniacza słuchawkowego. Stwierdzili bowiem, że z uwagi na specyfikę sygnałów muzycznych i sposób użytkowania, przeciętna sprawność zwykłego wzmacniacza słuchawkowego wynosi około 3%. W celu zmniejszenia strat nie stosowali jednak wzmacniacza impulsowego klasy D, tylko wykorzystali idee klasy G oraz H. Układ wzmacniający obok właściwego stereofonicznego wzmacniacza z obwodami serwo DC, zawiera podwójną pompę ładunku (*charge pump*), a do tego inteligentny cyfrowy układ sterujący pracą tej pompy, stosownie do zawartości odtwarzanego sygnału muzycznego. Co istotne, pompa ładunku, w przeciwieństwie do klasycznych rozwiązań klasy H, nie zawiera zewnętrznych kondensatorów; nie są też potrzebne separujące kondensatory wyjściowe, co jest istotne w przypadku subminiaturowych urządzeń (kodek WM8903 w 40-pinowej obudowie QFN ma wymiary 5x5x0,55 mm). Dzięki zastosowanym rozwiązaniom, pobór mocy przez wzmacniacz słuchawkowy jest rzędu 4,4 mW.

Klasa X

Klasa X też jest „klasą handlową”. Według skąpych informacji, wzmacniacz klasy X jest w istocie wzmacniaczem klasy D lub T z inteligentnym, cyfrowo sterowanym zasilaczem impulsowym. Wzmacniacze klasy X to przede wszystkim wzmacniacze samochodowe, zasilane napięciem 14,4 V. Na fot. 81 pokazano wzmacniacz do subwofera HK8025X firmy m.a. audio, o całkowitej mocy 4400 W. Na fot. 82 przedstawiono wnętrze innego wzmacniacza klasy X – jak widać, sercem jest moduł wzmacniacza Tripath.



Fot. 81.

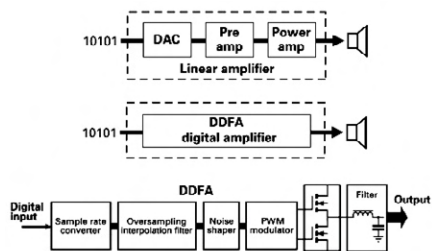


Fot. 82.

Klasa Z

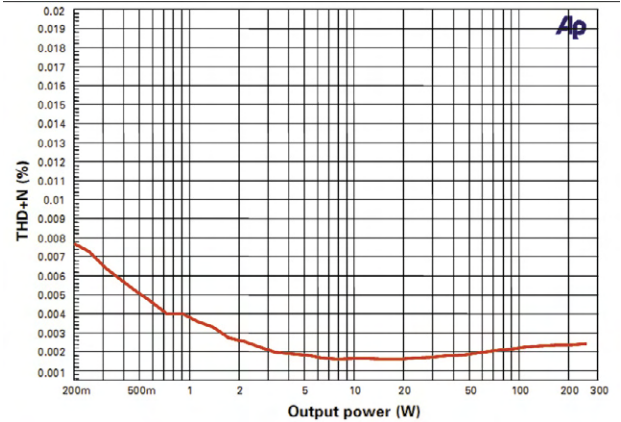
Klasa Z to zastrzeżony znak handlowy coraz lepiej znanej firmy Zetex. Wprawdzie aktualnie Zetex zamiast określenia *Class Z* preferuje skrót DDFA™ (Direct Digital Feedback Amplifiers), niemniej warto wiedzieć o wzmacniaczach tej klasy. Przede wszystkim chodzi o wzmacniacze impulsowe, wywodzące się z klasy D, jednak bliżej spokrewnione z klasą T z uwagi na inteligentne sterowanie tranzystorami kluczującymi MOSFET. Co istotne, wzmacniacz Zetexa zasługuje na miano wzmacniacza cyfrowego. Nie tylko z uwagi na zaawansowaną cyfrową obróbkę sygnału, ale też na fakt, że w przeciwieństwie do klasycznych wzmacniaczy, na wejście podaje się sygnał cyfrowy PCM, a nie analogowy (rys. 83).

System składa się z dwóch oddzielnych procesorów: jednego będącego cyfrowym modulatorem PWM (ZXCZM800) i drugiego,



Rys. 83.

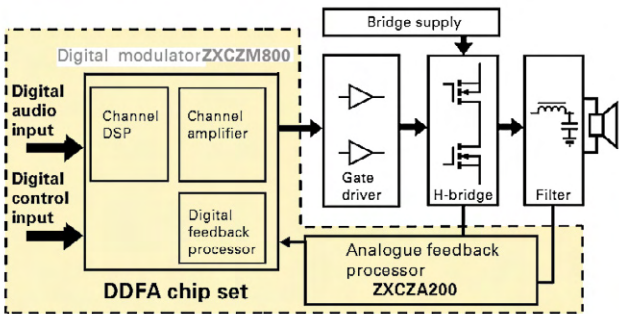
Firma podaje, że dzięki zastosowanej architekturze oraz algorytmom sterowania, jakość dźwięku nie ustępuje najlepszym wzmacniaczom analogowym klas AB i A. Dynamika wzmacniacza sięga 120 dB, a poziom zniekształceń harmonicznych jest mniejszy niż 0,004%. Na rys. 85 pokazano zmierzone wartości współczynnika zniekształceń. Na fot. 86 pokazane są moduły wzmacniaczy mocy klasy Z.



Rys. 85.

Zamiast zakończenia

Oprócz klas wymienionych w artykule zapewne można byłoby znaleźć jeszcze inne. Praktycznie wszystkie egzotyczne klasy są wprowadzane i reklamowane ze względów marketingowych. Zapewne będą też powstawać kolejne „klasy handlowe”. Współczesny elektronik interesujący się techniką audio nie musi znać wszystkich klas. Powinien mieć wiedzę na temat „kanonicznych” klas A, AB, B, C oraz klasy D, a także wiedzieć o wzmacniaczach mostkowych i klasach G, H. Wzmacniacze audio klasy A są wykorzystywane rzadko, a wzmacniacze „czyste” klasy B – nigdy. Ogromna większość typowych wzmacniaczy mocy audio pracuje w klasie AB. Także większość wzmacniaczy audiofilskich, w tym lampowych, to wzmacniacze klasy AB. Okazuje się, że ich zniekształcenia można redukować do znikomych wartości, stosując roz-



Rys. 84.

R E K L A M A

UKŁADY INTERNETOWE

AVT953

Karta wejść z interfejsem Ethernet

Stan wejść pomiarowych

IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6	IN7	IN8	IN9	IN10	IN11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

AVT966

Karta przełączników sterowana przez Internet

Wypięta

IN1	IN2	IN3	IN4
0	0	0	0

Stan przełączników

ON	OFF		
P1	P2	P3	P4

AVT927

Uniwersalny interfejs Internetowy

Microchip TCP/IP Stack

System Status

Output Control

Dostępne wersje:
A - płytki drukowane i dokumentacja: 69zł
B - komplet elementów z płytką: 98zł
C - układ zmontowany i uruchomiony: 220zł

Dostępne wersje:
A - płytki drukowane i dokumentacja: 86zł
B - komplet elementów z płytką: 187zł
C - układ zmontowany i uruchomiony: 300zł

Dostępne wersje:
A - płytki drukowane i dokumentacja: 60zł
B - komplet elementów z płytką: 147zł
C - układ zmontowany i uruchomiony: 240zł

www.sklep.avt.pl

AVT-Korporacja Sp. z o.o.,
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
tel. 022 257 84 50, fax 022 257 84 55,
e-mail: handlowy@avt.pl



Fot. 86.

maite rozwiązania układowe, konstrukcyjne oraz odpowiednie 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 zbyt dużą popularnością, głównie ze względu na koszmarnie wielkie straty ciepłne. Klasa A pozostaje domeną audiofilów, eksperymentatorów i snobów. Właśnie problem mocy i strat ciepłnych stał się bezpośrednią przyczyną opracowania wzmacniaczy klas G i H. Dziś jednak przyszłością są wzmacniacze klasy D. Niewątpliwie będą one znajdować jeszcze szersze zastosowanie w sprzęcie elektronicznym, w pierwszej kolejności miniaturowym i zasilanym z baterii. Co do tego nie ma wątpliwości. Trudniej natomiast przewidzieć, czy i jak szybko ulepszone wzmacniacze impulsowe wyprą wzmacniacze klasy AB ze sprzętu przeznaczonego dla bardziej wymagających i zamożnych słuchaczy. Sytuacja jest wciąż niejasna. Kwestia ceny elementów wcale nie jest najważniejsza. Elementy do wzmacniaczy klasy D są coraz tańsze i ceną rywalizują z klasycznymi wzmacniaczami AB. Wzmacniacze klasy AB na razie trzymają się jednak mocno także dlatego, że nie wytwarzają zakłóceń, natomiast we wzmacniaczach klasy D z natury rzeczy występują potężne impulsy prostokątne o częstotliwościach setek i tysięcy kiloherców, przez co są one generatorami silnych zakłóceń o szerokim spektrum. Oczywiście jest to duże wyzwanie dla konstruktorów, komplikujące taki sprzęt. W sumie o szybkim sukcesie lub zwłoce we wprowadzaniu „cyfrowych” wzmacniaczy większej mocy mogą zadecydować powody bardzo dalekie od racjonalnych. Wiadomo, że już obecnie mało kto potrafi rozróżnić na podstawie brzmienia wzmacniacze klas A, AB, a nawet lepsze wersje klasy D. Powszechne wykorzystanie muzyki z plików MP3, AAC i innych formatów z kompresją stratną, stawia pod znakiem zapytania sens walki o jak najwyższe parametry wzmacniacza mocy, jeśli odtwarzana muzyka z natury jest skażona piętnem kompresji. Ewentualne subtelne niedoskonałości wzmacniacza nie mają już znaczenia w porównaniu ze zubożeniem dźwięku, wynikającym z kompresji stratnej.

Niewykluczone więc, że wzmacniacze rozmaitych odmian i mutacji klasy D rozpowszechnią się szybko także w sprzęcie o większej mocy. Wytwórcy półprzewodników oferują coraz to lepsze odmiany wzmacniaczy klasy D, a także inne rozwiązania wzmacniaczy mocy. Główne kierunki są następujące: zwiększenie sprawności energetycznej oraz uzyskanie dobrych parametrów przy jak najprostszych i najmniejszych układach. Warto zapoznać się z aktualną ofertą wzmacniaczy mocy takich choćby wytwórców jak National (www.national.com), Philips – ściślej NXP (www.nxp.com), Maxim (www.maxim-ic.com), ST (www.st.com), Texas Instruments (www.ti.com) oraz ze sterownikami firmy International

Rectifier (www.irf.com), pozwalającymi budować wzmacniacze impulsowe o mocach do 500 W, np IRS20955. Obok wzmacniaczy klas AB i D, Maxim proponuje wzmacniacze klasy G, natomiast ST – wzmacniacze w technologii BASH, gdzie analogowy wzmacniacz AB współpracuje z cyfrowo sterowanym zasilaczem impulsowym, wytwarzającym napięcia zasilające o wartościach odpowiadających chwilowym poziomom przetwarzanego sygnału.

Dobrym przykładem elastyczności mogą być czterokanałowe samochodowe wzmacniacze klasy D TAS5414A, TAS5424A Texas Instruments. Każdy z 4 kanałów może przy zasilaniu 14,4 V i zniekształceniach 1% dostarczyć 23 W mocy do obciążenia 4 Ω i 38 W do obciążenia 2 Ω . Ten impulsowy wzmacniacz daje też możliwość równoległej pracy wszystkich czterech kanałów na obciążenie 1 Ω . Ta samochodowa kostka może być też zasilana nieco wyższym napięciem: przy $U_{zas}=21$ V, $R_L=2$ Ω i pracy równoległej, moc wyjściowa przekracza 100 W.

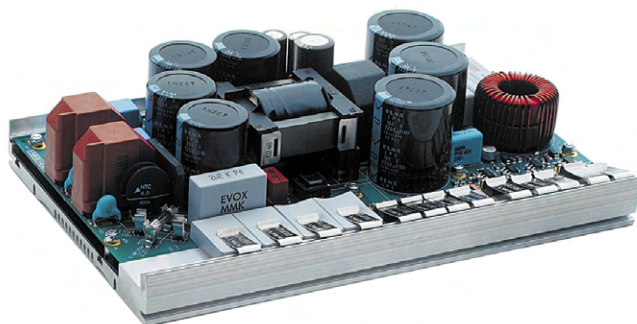
Oprócz podzespołów (układów scalonych i tranzystorów mocy), liczne firmy oferują też gotowe moduły impulsowych końcówek mocy. Na fot. 87 pokazano moduł ICEpower1000ASP firmy Bang & Olufsen. Jest to wzmacniacz impulsowy o pełnym paśmie 20 Hz...20 kHz z zasilaczem sieciowym 230 V. Całość ma wymiary 15x23,3x5,7 cm. Moc wyjściowa wynosi 1000 W. Typowy poziom zniekształceń nieliniowych THD+N to 0,007%, intermodulacyjnych IMD – 0,002% i przejściowych TIM – 0,003%.

Przypominam, że wzmacniacze klasy D nie można nazwać cyfrowymi, ponieważ zasada pracy jest w swej istocie analogowa, niemniej rozwój idzie w kierunku wzmacniaczy, które w pełni zasługują na miano cyfrowych, dla których sygnałem wejściowym jest cyfrowy ciąg impulsów, a właściwie liczb (PCM). Opisana wcześniej klasa Z wcale nie jest jedynym przykładem. Klasa Z musiała pojawić się w artykule, którego głównym tematem są właśnie klasy wzmacniaczy. Oprócz rozwiązań firmy Zetex istnieją też inne, bardzo zaawansowane, pochodzące od renomowanych wytwórców. Przykładem może być technologia DDX firmy Apogee, wykorzystywana przez ST (www.st.com) oraz całkowicie cyfrowa koncepcja Pure Path Digital oferowana przez Texas Instruments. Aktualnie procesory sygnałowe i mostki MOSFET-ów Pure Path Digital, pozwalające realizować wzmacniacze o mocach ponad 300 W (TAS5261) i znakomitych właściwościach. Firma ma w swej ofercie szereg innych interesujących kostek, choćby TAS5706 – całkowicie cyfrowy, ulepszony wzmacniacz impulsowy. Zawiera on cztery niezależne kanały, mogące pracować w rozmaitych konfiguracjach: 4x10 W, 2x20 W, 2x10 W+ subwoofer 20 W. Układ aplikacyjny jest prosty, ale dla hobbystów problemem będzie wlutowanie w płytkę tej 64-wyprowadzeniowej kostki o wymiarach 10x10 mm.

Na naszych oczach odbywa się kolejny ważny etap przemian w dziedzinie sprzętu audio. Już od kilku lat w torach sygnałowych sprzętu audio królują systemy cyfrowej obróbki dźwięku DSP (*Digital Signal Processing*). Teraz wdzierają się one także do wzmacniaczy mocy. Warto obserwować, jak szybko wzmacniacze klasy D i wzmacniacze cyfrowe upowszechnią się w domowych i profesjonalnych wzmacniaczach.

Nie ulega jednak wątpliwości, że hobbysci nadal będą konstruować najrozmaitsze wzmacniacze analogowe.

Piotr Górecki



Fot. 87.

Jeśli chcesz praktycznie poeksperymentować ze wzmacniaczami audio, wypełnij ankietę – ranking (w rubryce SPRZĘŻENIE ZWROTNE) i wybierz podarek – 1 szt. spośród kilkunastu typów najsłynniejszych scalaków – wzmacniaczy audio. Noty aplikacyjne tych układów znajdziesz na CD... >>> 

Drogi Czytelniku!

Jak się czujesz po lekturze 22 stron o wzmacniaczach audio? Nie będziemy ukrywać, to tylko gra wstępna. Za miesiąc nasz „Letni Kurs Audio” osiągnie stan szczytowania. Emocje rozpalą do białości dwaj charyzmatyczni redaktorzy – elektronik Piotr Górecki i audiofil Andrzej Kisiel. Jednym tchem przeczytasz ich „rozprawki” na odwieczne tematy: „lampa kontra tranzystor”, „czy słyszać kable”, pomiary czy słuch”. Oto kilka cytatów – przedsnak lektury, którą przyniesie Ci wrześniowy numer EP.

Z punktu widzenia elektronika:

... Jestem elektronikiem z zamiłowania i wykształcenia. Elektronika, w tym techniką audio, zajmuję się od ponad 30 lat, dość dobrze rozumiem parametry techniczne, potrafię je zmierzyć. Wykonałem niejedną układ elektroakustyczny, w tym niemało wzmacniaczy. Przyznaję się bez bicia, że nie słyszę różnicy dźwięku po zmianie metrowej długości kabelka połączeniowego między odtwarzaczem i wzmacniaczem. Oczywiście nie potrafię też po dźwięku poznać, jakiej firmy i jakiej jakości są wtyczki Chinch zastosowane w tym kabelku. Nie podejmuję się też dyskusji o różnicy między zniekształceniami 0,05% i 0,005%. ...

... Nie potępiam prawdziwych ~~audiofilów~~, przepraszam, skreśliłem słowo – nie potępiam prawdziwych melomanów. Celowo przekreśliłem słowo audiofil. Moje dotychczasowe doświadczenia i lektura doprowadziły do tego, że słowo audiofil i audiofilski źle mi się kojarzą – z kimś, kto tak naprawdę jest ignorantem, nie rozumie ani problemów technicznych, nie ma też wrażliwości muzycznej, a co najgorsze, oprócz niedouczenia, charakteryzuje się dużą dozą zarozumiałości i kłótniwości. ...

... Różnice w dźwięku wynikają przede wszystkim z właściwości głośników i kolumn. Różnice między wzmacniaczami są już niewielkie, a sprawa parametrów wtyczek i kabli to jedno wielkie oszustwo. ...

Z punktu widzenia audiofila:

... Kłopot z audiofilami polega na tym, że pewne sprawy warte wzięcia pod uwagę rozdmuchują w sposób nieproporcjonalny do ich rzeczywistego znaczenia; skądinąd elektronicy o tych sprawach mogą w ogóle nie mieć pojęcia, albo znają je tylko ze słyszenia (zwykle mając znajomych audiofilów) i są one dla nich tylko dowodem na audiofilską aberrację. Ale i elektronicy nie mają całej racji po swojej stronie, bo po pierwsze lekceważą pewne zjawiska, które występują jak najbardziej realnie, chociaż nie zawsze dają się zauważyć na ekranie oscyloskopu, po drugie często oceniają audiofilów przez pryzmat największych wynaturzeń spotykanych na tym polu, które jednak nie są powszechne i nie określają sposobu myślenia i działania większości. ...Bowiem wcale nie każdy audiofil łączy wzmacniacz z głośnikami kablowymi za kilka tysięcy złotych. ...

... Wzmacniacz dla elektronika jest przede wszystkim czytelnym układem. Dla audiofila jest ciężkim, poważnym, często pięknym urządzeniem, które nie tylko wzmacnia sygnał, ale i kształtuje go, w dużym stopniu wpływając na brzmienie całego systemu audio. Co ciekawe, prawdziwy audiofil nie dopuszcza jednak możliwości świadomego ingerowania w brzmienie za pomocą regulatorów barwy, korektorów graficznych itp., boienn nadrzedną ideą jest odtwarzanie muzyki z wysoką wiernością, czyli z charakterystyką przetwarzania jak najbliższą liniowej, a nie zniekształconą manipulacjami mającymi uczynić brzmienie „przyjemniejszym”. ...

Wzmacniacze mocy audio



AVT2153
Wzmacniacz mocy z TDA7294

100W



Wzmacniacz mocy z LM3886
AVT2180

2x100W



AVT2736
Mostkowy wzmacniacz mocy z TDA7294

400W

www.sklep.avt.pl