

# Magazyn Elektroniki Użytkowej

dodatek  
do  
miesięcznika



P o z n a ć i z r o z u m i e ć s p r z ę t

Misją **Magazynu Elektroniki Użytkowej** (MEU) jest zagwarantowanie Czytelnikom EdW minimum wiedzy o elektronicznym sprzęcie używanym przez współczesnego człowieka w życiu codziennym.

Są zagadnienia, których elektronikowi po prostu nie wypada nie znać. Właśnie rolą **MEU** jest dostarczyć Ci minimum wiedzy o tematach i terminologii będącej w powszechnym użyciu. Musisz się w tych sprawach orientować, chociażby po to, żeby zachować autorytet guru elektronicznego w kręgu najbliższych Ci osób. Traktujemy też **MEU** jako wstępną lekturę, która ułatwi Ci rozumienie artykułów w pismach specjalistycznych, takich jak **AUDIO**, **ŚWIAT RADIO**, **ESTRADA I STUDIO**, itp.

Konstrukcja **MEU** jest bardzo prosta - opiera się na czterech watach:

- \* **Aktualności** - wiadomo, że służą "trzymaniu ręki na pulsie", żeby zawsze wiedzieć o wszystkich nowinkach;

- \* **O tym się mówi** - rozjaśnia zagadnienia, o których w ostatnim czasie jest bardzo głośno;

- \* **To warto wiedzieć** - wyjaśnia zagadnienia, których - szczerze mówiąc - elektronikowi nie wypada nie znać i nie rozumieć;

- \* **Leksykon** - ma przygotować Czytelników EdW do lektury pism specjalistycznych.

W tym numerze przedstawiamy najważniejsze informacje o klasach wzmacniaczy, także tych najnowszych, oraz wyjaśniamy - co to jest RDS.

To warto wiedzieć

## Klasa T, czyli nowe i najnowsze wzmacniacze mocy

część 1

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

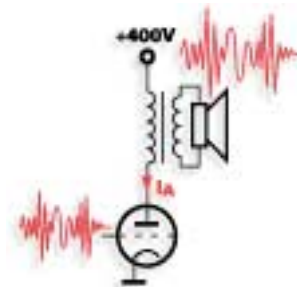
**Jednym z prostszych rozwiązań jest sięgnięcie do niniejszego, dwuczęściowego artykułu, który obszernie opisuje spotykane obecnie klasy wzmacniaczy mocy.**

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

### Klasa A

Pierwsze wzmacniacze mocy audio (power audio amplifiers) zawierały jedną lampę elektro- nową, a stopień wyjściowy wyglądał mniej

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

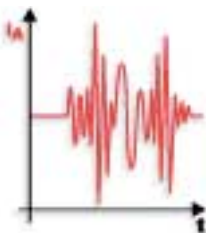


Rys. 1 Prosty wzmacniacz lampowy

Przez lampę i uzwojenie pierwotne transformatora z rysunku 1 przepływał jakiś znaczny spoczynkowy prąd stały. Sygnał audio modulował ten prąd spoczynkowy - przykładowy przebieg prądu lampy pokazany jest na **rysunku 2**. Jak widać, podczas normalnej pracy prąd nie powinien zmniejszać się do zera. Przez element czynny (w tym wypadku lampę) prąd powinien pły-

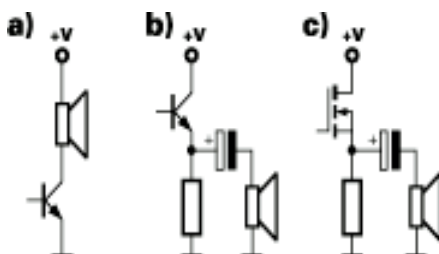
nać przez cały czas. I to właśnie jest wzmacniacz klasy A – prąd płynie przez element czynny nieprzerwanie.

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



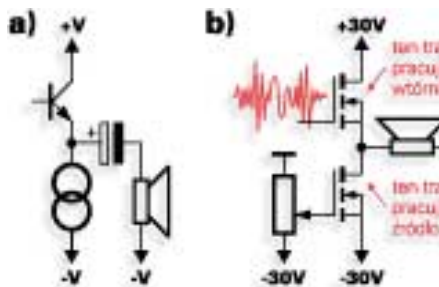
**Rys. 2 Przebieg prądu we wzmacniaczu klasy A**

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



**Rys. 3 Tranzystorowe wzmacniacze klasy A**

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

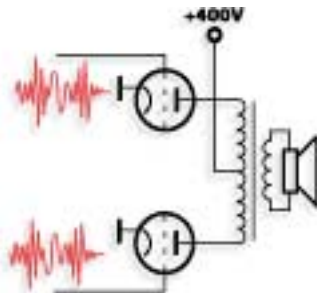


**Rys. 4 Wzmacniacz class A single ended**

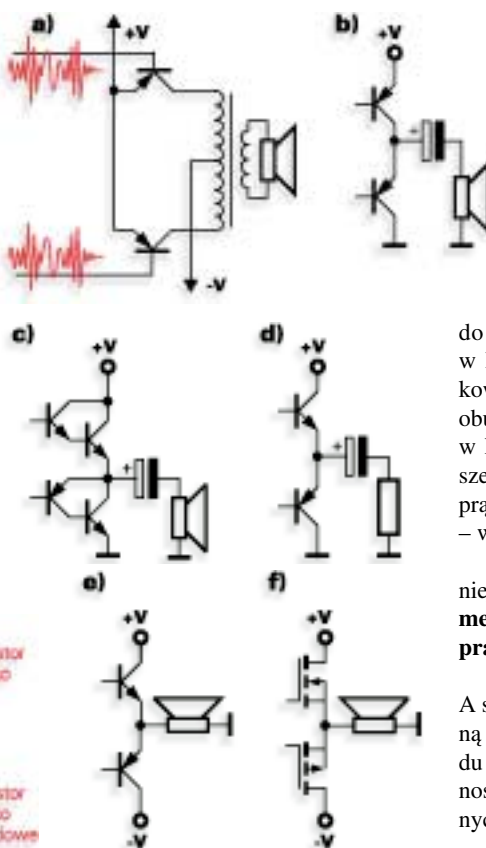
## A, B, C...

Zastosowanie dwóch lamp i transformatora z dzielonym uzwojeniem pierwotnym pozwala zbudować wzmacniacz symetryczny według **rysunku 5**. Zamiast lamp można wykorzystać tranzystory i zbudować tranzystorowy odpowiednik układu z rysunku 5 – po-

kazany jest on w uproszczeniu na **rysunku 6a**. Takie wzmacniacze, z tranzystorami germanowymi PNP, były budowane na początku ery tranzystorowej. Potem pojawiły się inne konfiguracje obwodów wyjściowych, nie zawierające dużego i kosztownego transformatora wyjściowego. Kolejne wersje pokazane są na **rysunkach 6b...6f**. Obecnie wykorzystywane są przede wszystkim konfiguracje z rysunku 6e i 6f oraz pochodne.



**Rys. 5 Wzmacniacz symetryczny**



**Rys. 6 Tranzystorowe stopnie końcowe**

O ile wzmacniacze z rysunków 1, 3, 4 z natury muszą pracować w klasie A, o tyle budowa stopni wyjściowych z rysunków 5 i 6 nie mówi absolutnie nic o klasie wzmacniacza. Na zamieszczonych uproszczonych schematach nie zaznaczono obwodów polaryzacji. Tymczasem muszą one występować w każdym wzmacniaczu i to właśnie one decydują o klasie wzmacniacza. **Rysunek 7** pokazuje bardzo uproszczony (nigdy nie stosowa-

wany w praktyce) obwód polaryzacji tranzystorowego stopnia wyjściowego. W rzeczywistości układy takie mają dodatkowe niewielkie rezystory emiterowe według **rysunku 7b**. W stanie spoczynku (przy braku sygnału audio) przez tranzystor T1 płynie jakiś prąd stały  $I_P$ . Prąd ten wywołuje jakiś spadek napięcia na rezystancji  $R_x$ . Pomijamy tu prądy baz, upraszczamy problem napięć, zakładając, iż na bazach i emiterach tranzystorów T2, T3 napięcie jest równe połowie napięcia zasilającego (tak jest w rzeczywistych wzmacniaczach), czyli przez głośnik nie płynie prąd ( $I_G=0$ ). Interesować nas teraz będzie jedynie spadek napięcia na rezystancji  $R_x$  i związany z tym prąd tranzystorów T2, T3, oznaczony  $I_S$ .

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

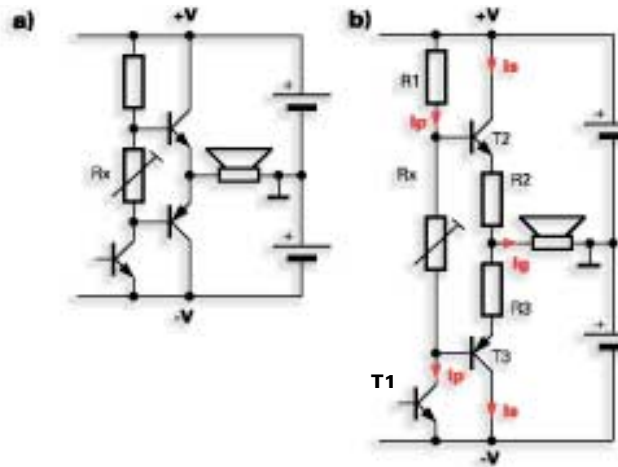
Jeśli rezystancja ta będzie duża, to przez oba tranzystory T2, T3 będzie płynął duży (jednakowy) prąd spoczynkowy. Na rysunku 7 oznaczony jest on  $I_S$ . Gdy pojawi się sygnał audio, chwilowa wartość prądu będzie się zmieniać w takt sygnału, a co ważne - prądy tranzystorów T2, T3 nie będą już jednakowe,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

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

Natomiast rysunek 8a pokazuje najważniejszy fakt: **we wzmacniaczu klasy A element, bądź elementy czynne przewodzą prąd przez cały czas**.

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

Na marginesie można wspomnieć o pewnych błędnych wyobrażeniach. Niektórzy niezorientowani elektronicy uważają, że wzmacniacz klasy A musi być zbudowany z pojedynczych elementów (lamp, tranzystorów), a nie układów scalonych. Choć oczywiście ogromna większość wzmacniaczy klasy A jest budowana z elementów dyskretnych, jednak, jak wykazano, pojęcie klasy nie ma prawie nic wspólnego z budową, a jedynie z faktem, że prąd przez elementy czynne płynie przez cały czas.



Rys. 7 Uproszczony stopień wyjściowy

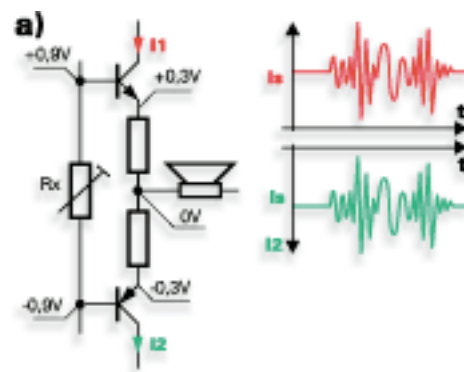
nie) wzmacniacz klasy B pozwala uzyskać na obciążeniu (głośniku) prawidłowy, niezniekształcony sygnał i to przy stosunkowo dużej sprawności energetycznej, wynoszącej niemal 80%.

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

### Klasa C

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

W klasie B możliwe jest (przynajmniej teoretycznie) uzyskanie na wyjściu sygnału o kształcie dokładnie takim samym, jak na wejściu.

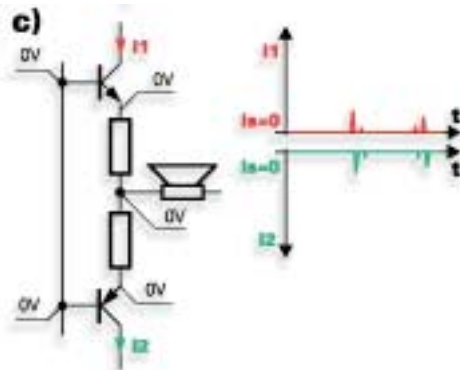
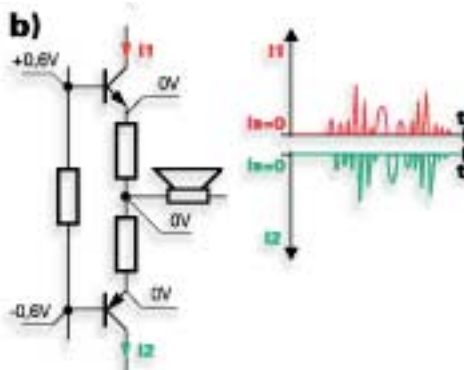


Rys. 8a Klasa A

### Klasa B

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

Rys. 8b Klasa B



Rys. 8c Klasa C

We wzmacniaczu klasy C jest to niemożliwe, bo "obcięte" przebiegi prądu zupełnie nie przypominają przebiegu wejściowego. Sygnał wyjściowy na pewno jest bardzo silnie zniekształcony, na mniejsze sygnały w ogóle przezeń nie przechodzą. Oczywiście wzmacniacze klasy C nie są wykorzystywane w technice audio (stosowane są tylko w układach alarmowych, gdzie ważna jest głośność a nie zniekształcenia oraz w układach w.cz., zazwyczaj we współpracy z obwodem rezonansowym).

### Klasa D

Jeśli oba tranzystory będą na przemian albo całkowicie otwiera-

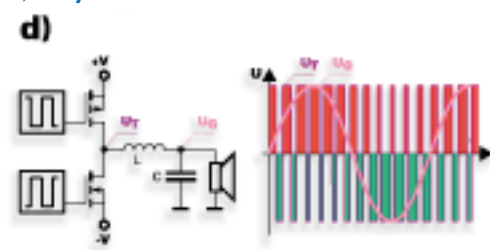
ne, albo całkowicie zamykane, układ będzie pracował w klasie D. Wbrew pozorom, jest to użyteczny tryb pracy. Stosując między wzmacniaczem a głośnikiem prosty filtr LC można uzyskać prawidłowy niezniekształcony sygnał. Pod warunkiem jednak, że otwieranie i zamykanie będzie odbywać się z częstotliwością kilka- bądź kilkunastokrotnie większą od najwyższej częstotliwości sygnału audio i że współczynnik wypełnienia impulsów będzie proporcjonalny do chwilowej wartości sygnału audio.

We wzmacniaczu klasy D elementy czynne pełnią jedynie rolę kluczy (otwarty/zamknięty) i dlatego zazwyczaj stopień wyjściowy zawiera tranzystory MOSFET. Wzmacniacz klasy D jest więc przetwornikiem (chwilowej wartości) napięcia na współczynnik wypełnienia impulsów o ponadakustycznej częstotliwości. Przykładowe przebiegi napięć na wyjściu tranzystorowego "siekacza" oraz za filtrem LC pokazane są na rysunku 8d. Rysunek 9 pokazuje zasadę działania wzmacniacza klasy D.

Ponieważ tranzystory wyjściowe są albo w pełni otwarte, albo zamknięte, nie wydziela się w nich moc strat. Teoretyczna sprawność wzmacniacza klasy D wynosi 100%, co znaczy, że cała moc pobrana z zasilacza jest doprowadzana do głośnika. W praktyce wzmacniacze klasy D osiągają sprawność 90...95%, co i tak jest rewelacyjnym wynikiem w porównaniu ze sprawnością wzmacniacza klasy B, wynoszącą teoretycznie 78%, oznacza bowiem kilkukrotne zmniejszenie mocy strat (i wielkości radiatorów).

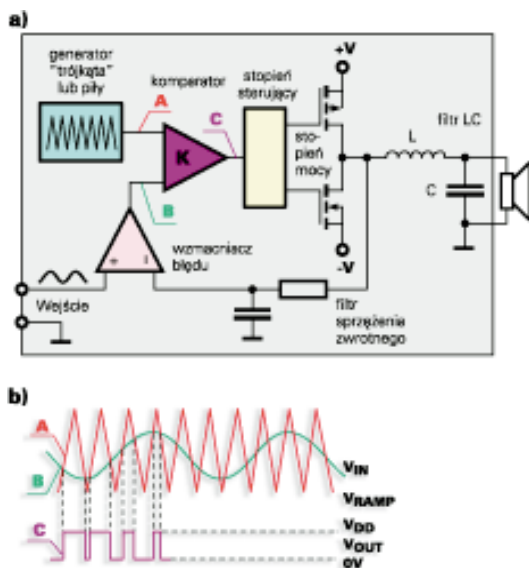
Wzmacniacz klasy D można słusznie nazwać *wzmacniaczem impulsowym* (*switching power amplifier*). Często spotyka się także określenie *PWM amplifiers*, gdzie PWM to Pulse Width Modulation, czyli modulacja szerokości impulsu. Znacznie mniej trafne, za to częściej stosowane ze względów reklamowych jest określenie *wzmacniacz cyfrowy* (*digital amplifier*). Słowo cyfrowy (D jak *digital*) kojarzy się z wysoką jakością, tymczasem wzmacniacze klasy D wcale nie wyróżniają się szczególnie dobrą jakością. Ich najważniejszą zaletą jest wysoka sprawność energetyczna, przez co możliwa jest daleko posunięta miniaturyzacja (małe radiatory), a bateryjne wzmacniacze klasy D pozwalają przedłużyć żywotność baterii nawet trzykrotnie.

Rys. 8d Klasa D





Wzmacniacze klasy D nie realizują więc "odwiecznego" marzenia audiofilów: jednocześnie wysokiej wierności odtwarzania i dużej sprawności energetycznej. O ile sprawność jest rzeczywiście imponująca (często przekracza 90%), o tyle zniekształcenia nieliniowe i intermodulacyjne są rzędu 1%, co w urządzeniach wyższej klasy jest nie do przyjęcia.



Rys. 9 Wzmacniacz klasy D

## Klasy pośrednie

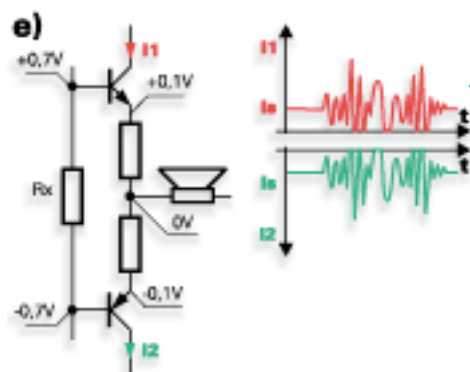
Wzmacniacze klasy A są wykorzystywane rzadko, a wzmacniacze "czystej" klasy B – nigdy. Ogromna większość typowych wzmacniaczy mocy audio pracuje w tak zwanej klasie AB. Stopnie wyjściowe wzmacniacza klasy AB w spoczynku przewodzą jakiś niewielki prąd – na rysunku 7 odpowiada to pośredniej wartości  $R_x$  pomiędzy klasą A i B. Każdy tranzystor przewodzi przez czas dłuższy niż połowa cyklu. W rezultacie przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje w klasie A, przy dużych – podobnie jak w klasie B. Przykładowe napięcia i prądy pokazane są na rysunku 8e. Wzmacniacze klasy AB łączą zalety klas A i B: mają nieduże zniekształcenia oraz stosunkowo dobrą sprawność energetyczną, rzędu 50...70%. W zależności od wartości prądu spoczynkowego mówi się o płytszej lub głębszej klasie AB. Czym większy prąd spoczynkowy, tym mniejsza sprawność, ale i mniejsze zniekształcenia. Typowe wzmacniacze (scalone i tranzystorowe) pracują przy niewielkich prądach spoczynkowych rzędu 20...100mA, podczas gdy maksymalny prąd tranzystorów w szczytach wystawienia wynosi kilka amperów.

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

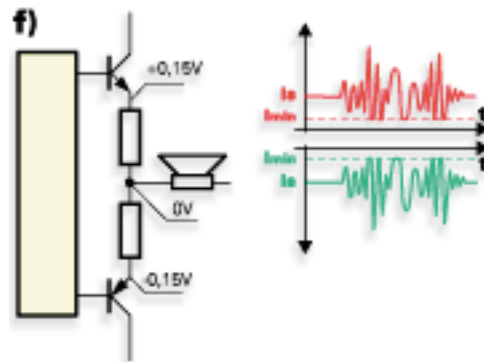
dy polaryzacji wzmacniacza klasy AB tak, by tranzystory nigdy nie zostały zatkane, a prąd nie był nigdy mniejszy od jakiejś wartości  $I_{min}$ . Przebiegi napięć i prądów wyglądałyby wtedy jak na rysunku 8f. Nie można tego zrealizować w typowych układach polaryzacji pracujących na zasadzie pokazanej na rysunku 7, bo mówiąc w największym uproszczeniu, do zatkania tranzystora wystarczy mniejsza różnica napięcia niż do jego otwarcia. Można to jednak zrealizować zupełnie inaczej, na przykład na zasadzie pokazanej w wielkim uproszczeniu na rysunku 10. Przez końcówki wzmacniacza operacyjnego U1 płynie jakiś prąd spoczynkowy  $I_p$ . Wywołuje on na rezystorach R5, R6 spadek napięcia, który nieco otwiera tranzystory T3, T4, powodując przepływ prądu spoczynkowego  $I_s$ . 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, T4.

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

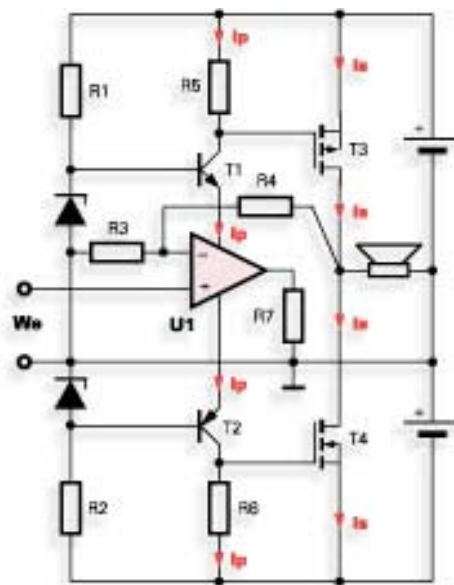
Rys. 8e Klasy wzmacniaczy



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



Rys. 8f Modyfikowana klasa AB



Rys. 10 Nietypowy wzmacniacz klasy AB

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

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

Piotr Górecki