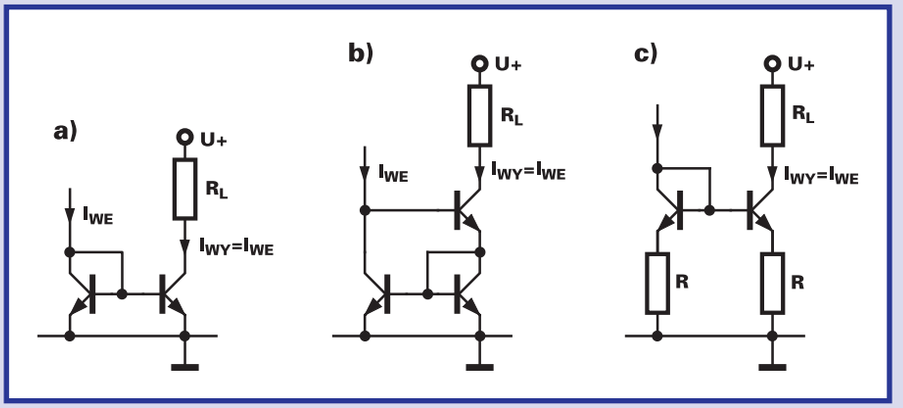
Zgodnie z obietnicą z ubiegłego miesiąca, zapoznam Cię z kolejnymi "cegiełkami" stosowanymi w praktycznie budowanych wzmacniaczach. Nie przegap tego materiału, bo na koniec przygotowałem niespodziankę, która niewątpliwie sprawi Ci dużo radości.

Źródła prądowe i układy powtarzania prądu

Źródło prądowe i układ powtarzania prądu poznałeś już wcześniej, gdy omawialiśmy podstawowe właściwości tranzystora w obwodach prądu stałego i rozważaliśmy wpływ temperatury. Na rysunku 12 zobaczysz schemat prostego i bardziej rozbudowanego układu powtarzania prądu. Dodanie trzeciego tranzystora wg rysunku 12b znacznie poprawia właściwości układu z rysunku 12a, ale prościej można je polepszyć dodając niewielkie rezystory emiterowe wg rysunku 12c.

Układy powtarzania prądu, pełniące także często rolę źródeł prądowych, zbudowane według rysunku 12, wykorzystywane są bardzo często, ponieważ umożliwiają uniezależnienie parametrów układu od zmian napięcia zasilającego. Wtedy na przykład wzmacniacz pobiera niemal taki sam prąd spoczynkowy w bardzo szerokim zakresie napięć zasilających.



Rys. 12

Połączenie równoległe

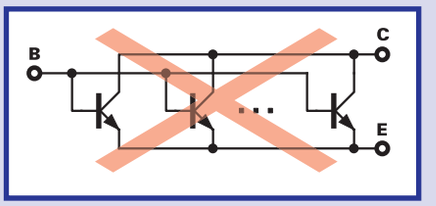
W celu zwiększenia prądu oraz mocy strat, kilka tranzystorów niekiedy łączy się równolegle. Wtedy nie zyskuje się żadnych specjalnych właściwości - po prostu powstaje tranzystor większej mocy. Budując potężny zasilacz albo wzmacniacz audio większej mocy, będziesz łączył tranzystory równolegle. Ale nigdy nie według rysunku 13.

Zastanów się, dlaczego? Czym to grozi?

A może zaproponujesz dobranie jednakowych tranzystorów, z jednej serii produkcyjnej i dodatkowo selekcjonowanych? Słusznie! Ale i wtedy nie wolno stosować połączenia według rysunku 13.

Dlaczego?

A z jaką dokładnością dobierzesz te tranzystory? Czy naprawdę będą idealnie jednakowe?

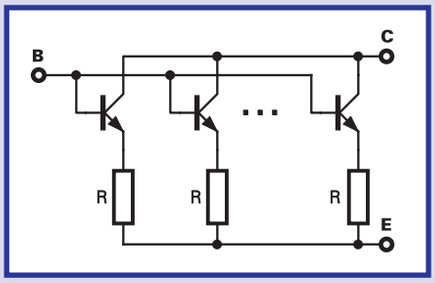


Rys. 13

Właśnie - nigdy nie będą idealnie jednakowe. A dodatkowo pojawią się różnice wynikające choćby z różnej długości ścieżek czy przewodów w obwodach baz i emiterów. I już bardzo drobne różnice wystarczą do zepsucia całej kosztownej baterii tranzystorów. Zacznie się to wszystko przy dużym sumarycznym prądzie, przekraczającym dopuszczalny prąd jednego tranzystora. Rozpocznie się od jednego z tranzystorów, przez który będzie płynął prąd odrobinę większy niż przez inne tranzystory. Ten jeden tranzystor nagrzeje się minimalnie bardziej niż inne...

To zapoczątkuje katastrofę. Jak pamiętasz, wzrost temperatury powoduje zmniejszenie napięcia U_{BE} (a przy stałym napięciu U_{BE} powoduje szybki wzrost prądu bazy i kolektora). W tym wypadku napięcie U_{BE} będzie takie samo jak w pozostałych tranzystorach, a więc prąd tego najcieplejszego tranzystora będzie wzrastał. Wzrost prądu (przy niezmiennym napięciu U_{CE}) oznacza wzrost mocy strat i dalszy wzrost temperatury tego jednego tranzystora. To jeszcze bardziej zwiększy prąd, temperaturę i... w końcu ten jeden tranzystor przejmie na siebie cały prąd z innych, coraz chłodniejszych tranzystorów. Oczywiście po krótkim czasie temperatura nadmiernie wzrośnie i ten tranzystor zostanie uszkodzony. Jeśli się zewrze, oznacza to koniec zabawy - urządzenie przestanie działać, niemniej uszkodzeniu ulegnie tylko ten tranzystor. Co jednak bardziej prawdopodobne, ten przeciążony tranzystor nie zewrze się, tylko rozewrze. Wtedy cały prąd przejmą pozostałe ocalałe tranzystory. Po pewnym czasie jeden z nich będzie miał temperaturę minimalnie wyższą niż inne... Sytuacja powtórzy się i to właśnie on "strzeli" w następnej kolejności. Potem następny, i tak kolejno uszkodzą się wszystkie. Miła perspektywa!

Aby zapobiec nieszczęściu, wystarczy w obwodach wszystkich emiterów dodać niewielkie rezystory według **rysunku 14**, by przy największym spodziewanym



Rys. 14

prądzie tranzystora, spadek napięcia na tym dodatkowym rezystorze wynosił 0,1...0,4V. W zasadzie czym więcej, tym lepiej, jednak nie warto przesadzać, bo w rezystorach tych przy dużych prądach będzie się wydzielać znaczna moc strat.

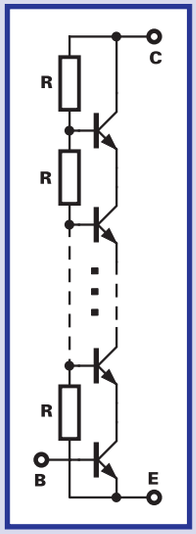
Połączenie szeregowe tranzystorów

W literaturze znajdziesz być może wskazówki, jak połączyć kilka tranzystorów niskonapięciowych w wysokonapięciowy. Towarzyszyć temu będzie schemat podobny jak na **rysunku 15**. Obejrzyj taki schemat, uśmiechnij się i... zapomnij. Nigdy nie będziesz stosował takich "wynalazków". Dziś dostępne są przyzwoite tranzystory wysokonapięciowe i naprawdę nie ma potrzeby zawracać sobie głowy schematem z **rysunku 15**.

Tylko jedno wyjaśnienie - może czasem zbudujesz wzmacniacz wysokonapięciowy w układzie kaskodowym (rysunek 6). Pamiętaj, że tylko górny tranzystor ma być wysokonapięciowy. Dolny zawsze pracuje przy niskim napięciu i może to być jakikolwiek tranzystor o odpowiednim prądzie kolektora.

Wyjście przeciwsobne

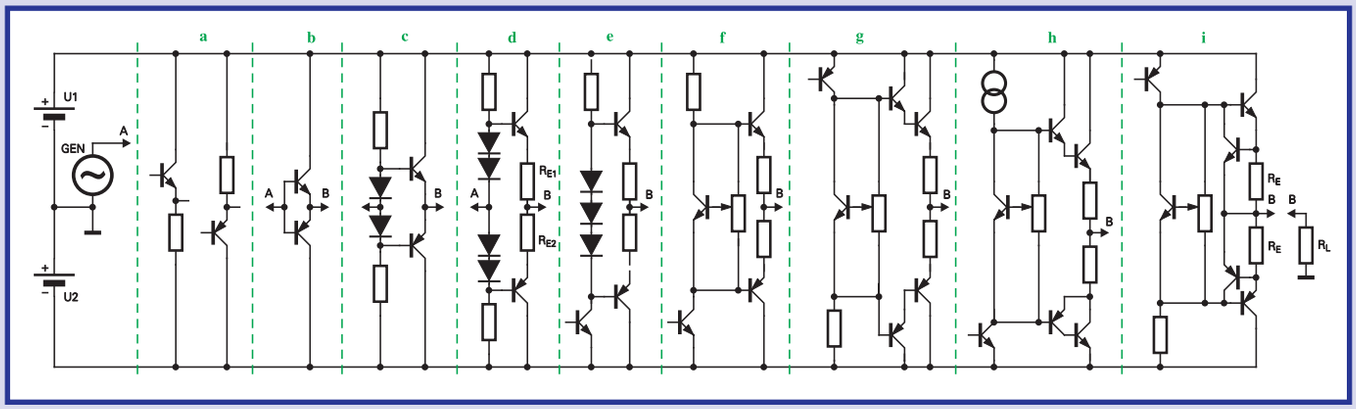
Prawdopodobnie zauważyłeś, że omówione wcześniej wzmacniacze OC, OE i OB mają niezbyt dobre właściwości wyjściowe. Nawet najlepszy pod tym względem układ OC nie zachowuje się jednakowo przy wzroście i zmniejszaniu



Rys. 15

się napięcia wyjściowego, a ponadto w spoczynku pobiera znaczny prąd. W EdW3/99 na rysunku 11b na stronie 65 podałem Ci schemat symetrycznego wtórnika, jaki bywa stosowany czasem w praktyce. Nieporównanie częściej stosuje się jednak prostszy i lepszy układ, mający podobne właściwości. Dotyczy to zwłaszcza stopni wyjściowych większej mocy, w tym stopni końcowych wzmacniaczy audio. Etapy rozwoju takiego układu i kolejne odmiany stosowane w praktyce zobaczysz na **rysunku 16**. Dla ułatwienia analizy załóżmy, że układy są zasilane napięciem symetrycznym.

Z dwóch okładów z rysunku **a** robimy najpierw prościutki układ z rysunku **b**. W spoczynku nie pobiera on prądu. Niestety, w zakresie napięć wejściowych ±0,6V żaden z tranzystorów nie przewodzi. Jest to poważna wada. Można ją wyeliminować na wiele sposobów. Rysunek **c** pokazuje sposób z wykorzystaniem diod. Spadek napięcia na diodach jest mniej więcej taki, jak napięcie U_{BE} tranzystorów, więc oba tranzystory są na granicy przewodzenia (płynie przez nie jakiś maleńki prąd spoczynkowy. Liniowość takiego symetrycznego wtórnika jest znacznie lepsza, niż poprzedniego układu, jednak też nie jest rewelacyjna. Ponadto trudno kontrolować drobne różnice i (temperaturowe) zmiany napięć diod i napięć U_{BE} tranzystorów, które będą powodować znaczne zmiany prądu płynącego przez tranzystory (zwłaszcza przy różnych temperaturach diod i tranzystorów). Dlatego w praktyce bywa czasem stoso-



Rys. 16

wany sposób z rysunku **d**, gdzie dodatkowe rezystory stabilizują punkt pracy tranzystorów i wyznaczają prąd spoczynkowy. Oczywiście suma spadków napięcia na tych niewielkich rezystorach jest równa napięciu przewodzenia dwóch dodatkowych diod. Zmieniając wartości R_{E1} i R_{E2} można ustalić potrzebny w danym zastosowaniu prąd spoczynkowy.

W praktycznych układach taki stopień wyjściowy jest sterowany "od dołu" przez tranzystor NPN. Wtedy zamiast czterech diod, wystarczą trzy wg rysunku **e**. A jeszcze częściej do ustalenia punktu pracy tranzystorów wyjściowych, zamiast diod, wykorzystuje się układ z rysunku **f**. Zastanów się nad działaniem tranzystora i potencjometru. Już rysunki d, e sugerują, iż zastępuje on kilka diod. W samej rzeczy - potencjometr umożliwia płynną regulację "liczby diod", a tym samym płynną regulację prądu spoczynkowego. A najważniejsze, że taka "zwielokrotniona dioda" ma charakterystyki termiczne podobne jak zestaw diod. Ten dodatkowy tranzystor montuje się blisko tranzystorów wyjściowych (na radiatorze) i wtedy przy zmianach temperatury tranzystorów prąd spoczynkowy prawie się nie zmienia.

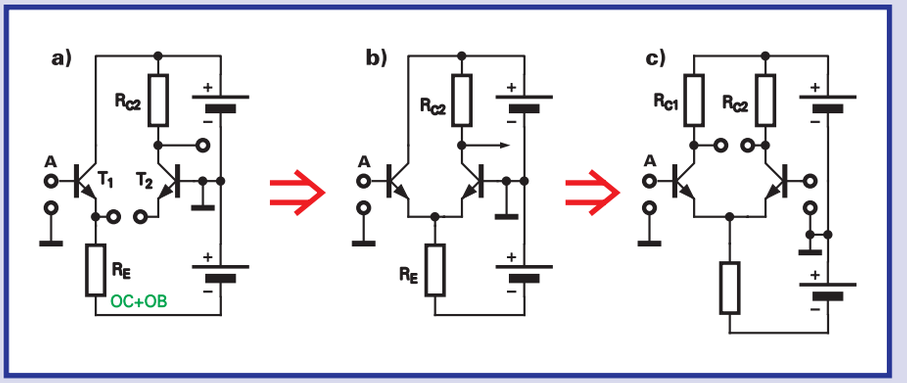
W stopniach większej mocy spotyka się darlingtony, zwykłe i komplementarne - zobacz rysunek **g**, a także rysunek **h**, gdzie oba wyjściowe tranzystory (mocy) są typu NPN. Tranzystor sterujący może być umieszczony "u góry", jak na rysunku g, albo "na dole", jak na rysunkach e, f, h. Zamiast rezystora dość często stosowane bywają źródła prądowe, jak na rysunku h.

W praktyce zwykle dodaje się jeszcze obwody ograniczania prądu, jak na rysunku **i**. Wtedy nawet przy zwarciu wyjścia, prąd maksymalny zostanie ograniczony do wartości około $0{,}6V/R_E$.

Przy okazji drobna dygresja. Jeśli w spoczynku przez tranzystory płynie duży prąd, a w czasie pracy prąd żadnego z tranzystorów nie spada do zera, mówimy o pracy w klasie A (np. rysunek 16a). Gdy w spoczynku tranzystory są na progu przewodzenia, a prąd pojawia się dopiero po pojawieniu się sygnału, mamy do czynienia z klasą B (np. rys. 16c). Gdy w spoczynku prąd nie płynie i nawet przy małych sygnałach tranzystory są zatkane, mamy do czynienia z klasą C (np. rys. 16b). Klasa A oznacza małe zniekształcenia, ale duże straty mocy. Oszczędne klasy B i C wiążą się niestety z dużymi zniekształceniami. Dlatego w praktyce wyznacza się pracę stopnia w głębszej lub płytszej pośredniej klasie AB, stosując układy z rysunków 16d...i ustalając kompromisowo prąd spoczynkowy. Czym większy ten prąd, tym mniejsze zniekształcenia. Oczywiście, są to tylko ogólne zasady i w rzeczywistości ustalając wartość prądu spoczynkowego należy uwzględnić szereg innych czynników. Takie rozważania wykraczają jednak poza ramy niniejszego cyklu.

Wzmacniacz różnicowy

Teraz kolejny ważny układ. Połączmy dwa wzmacniacze (OC i OB) w jeden – ilustruje to **rysunek 17a** i **17b**.



Rys. 17

Jakie właściwości będzie miał ten układ?

Gdy napięcie w punkcie A rośnie, rośnie też napięcie na emiterze T1. Ponieważ napięcie U_{BE} tranzystora T2 maleje, zmniejsza się prąd płynący przez T2 i R_{C2}. Napięcie na kolektorze T2 (w stosunku) do masy rośnie. Do całkowitego zatkania tranzystora T2 wystarczy podnieść napięcie wejściowe o kilkadziesiąt miliwoltów. Podobnie, aby go nasycić wystarczy obniżyć je o kilkadziesiąt miliwoltów. Już to pokazuje, że układ ma duże wzmocnienie prądowe i napięciowe, podobnie jak wzmacniacz OE. Czy widzisz tu jakieś podobieństwa z układem OE? Czy nie masz wrażenia, że układ z rysunku 17b ma właściwości podobne jak wzmacniacz OE, tylko nie odwraca fazy?

Tu rzeczywiście rezystancja wejściowa będzie podobna jak w układzie OE - nie przeocz faktu, że obciążeniem tranzystora T1 wbrew pozorom nie jest rezystancja R_E, tylko równoległe połączenie R_E i r_e tranzystora T2 - porównaj rysunek 4 w EdW 7/99. Wobec tego rezystancja wejściowa będzie niewielka, równa

$Rwe = 2r_e$

Czyli tylko dwukrotnie większa niż w układzie OE.

Natomiast wzmocnienie jest dwukrotnie mniejsze i wynosi

$Ku = R_{C2} / 2r_e$

Niemniej nie jest to tylko "nieodwracający odpowiednik wzmacniacza OE" - ten układ ma szereg cennych właściwości, nie spotykanych we wcześniejszych wzmacniaczach. W praktyce występuje raczej w postaci jak na rysunku 17c - z dwoma jednakowymi rezystorami w obwodach kolektorowych tranzystorów. Bardzo często wykorzystuje się sygnał z obu kolektorów, czyli różnicę napięć na kolektorach. Mówimy wtedy o wyjściu różnicowym.

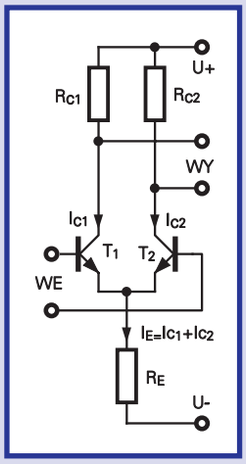
Może zresztą widziałeś ten układ w nieco odmiennej postaci, pokazanej na **rysunku 18** i nazywanej wzmacniaczem różnicowym. Różnicowym, ponieważ zarówno wejście i wyjście są różnicowe. Sygnał wejściowy nie jest już podawany miedzy masę a jedno wejście, tylko miedzy dwa wejścia. Nie masz chyba wątpliwości, że sygnał wyjściowy jest tu proporcjonalny do różnicy napięć na bazach obu tranzystorów. Czy tylko?

Analiza matematyczna wzmacniacza różnicowego (z wykładniczą zależnością prądu kolektora od napięcia U_{BE}) przestraszyła już niejednego początkującego adepta elektroniki. My nie będziemy się w to wgłębiać. Nie bój się – wzmacniacz różnicowy możesz na dobry początek potraktować jako połączenie wzmacniaczy OC i OB jak na rysunku 17 – łatwiej będzie Ci zrozumieć jego podstawowe właściwości. Możesz założyć, że jedno wejście ma stały potencjał, a napięcie zmienia się tylko na drugim, albo odwrotnie. Tak jest, można powiedzieć, że układ ma "jednakowe właściwości z obu stron". Potem powinieneś podejść do niego inaczej. Już schemat z rysunku 18 wskazuje, że jest to układ symetryczny. Jak to rozumieć? Od czego zacząć?

Uważaj - przez wspólny rezystor emiterowy R_E płynie jakiś prąd I_E. Pomińmy prądy baz - wtedy powiemy, że prąd I_E jest sumą prądów kolektora obu tranzystorów. Zaznaczyłem to na **rysunku 18**. Czy prądy I_{C1}, I_{C2} będą równe?

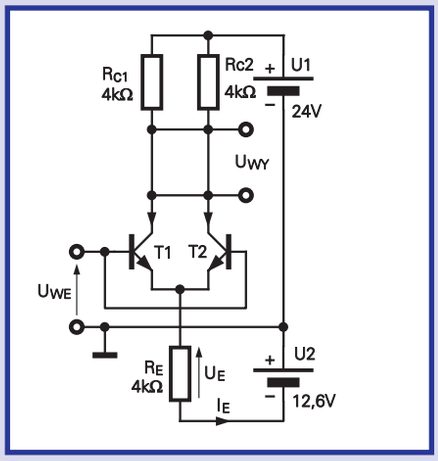
To zależy od różnicy napięć na bazach obu tranzystorów - zauważ, że to różnica napięć na bazach zmienia rozpływ prądu "emiterowego" pomiędzy dwa tranzystory, a tym samym zmienia różnicowe napięcie wyjściowe.

Jasne?



Rys. 18

A co wtedy, gdy na oba wejścia podamy takie same napięcie względem masy (lub zewrzemy je i podamy na oba jakieś napięcie zmienne)? Podajemy więc na zwarte wejścia napięcie współbieżne. Przeanalizuj układ samodzielnie, pomiń prąd bazy. Pomoże Ci **rysunek 19** (przyjąłem takie wartości napięć i rezystancji, żeby było łatwiej liczyć). Jakie będzie napięcie wyjściowe, gdy punkt A zewrzesz do masy? A jakie, gdy podasz nań napięcie stałe +4V, a potem -4V? Policz to!



Rys. 19

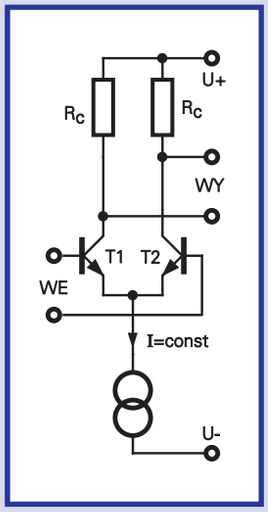
I co?

Okazuje się, że owszem, napięcia na kolektorach względem masy zmieniają się, ale zmieniają się jednocześnie. Natomiast różnicowe napięcie wyjściowe... stop, stop, za szybko. Tu pójdzie nam trochę trudniej. Rysunek 19 sugeruje, że różnicowe napięcie wyjściowe cały czas jest takie samo (równe zeru). W rzeczywistości aż tak dobrze nie jest - gdy napięcia na bazach będą minimalnie się różniły i będą się różniły prądy I_{C1}, I_{C2}, wtedy wpływ zmian napięcia współbieżnego będzie zauważalny. Ilustruje to **rysunek 20a, b, c,** gdzie to samo niewielkie różnicowe napięcie wejściowe U3 (nie ważne jakiej wartości - rzędu miliwoltów) powoduje podział prądu I_E w stosunku 2:1. Analiza rysunków 20a, b, c wykazuje, że choć różnicowe napięcie wejściowe cały czas jest takie samo (U3), jednak napięcie współbieżne U4 ma wpływ na różnicowe napięcie wyjściowe. Już zapewne zdążyłeś zauważyć, że zmiany te wynikają ze zmian prądu IE (i tym samym I_{C1}, I_{C2}). Co zrobić, by napięcie współbieżne nie zmieniało prądu I_E?

Masz jakiś pomysł?

Świetnie!

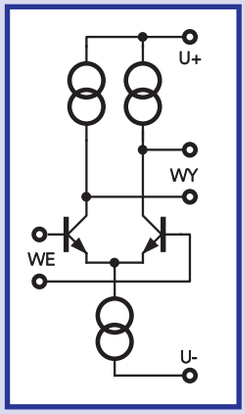
Wystarczy zamiast rezystora R_E zastosować źródło prądowe według **rysunku 21**. Gdy źródło prądowe jest idealne, to... no właśnie, wtedy prąd I_E zawsze jest taki sam i w konsekwencji napięcie współbieżne zupełnie nie wpływa na napięcia wyjściowe - przeanalizuj to samodzielnie. Fachowo powiemy, że taki układ ma nieskończenie wielki współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego. Ten **współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego** po angielsku nazywa się Common Mode Rejection Ratio - w skrócie CMRR. Zapamiętaj - często będziesz go spotykał. W praktyce źródło prądowe nie jest idealne, niemniej jednak znalazłeś skuteczny sposób na uniezależnienie się od napięć współbieżnych. Wtedy wzmocnienie sygnału wspólnego jest bliskie zeru, natomiast wzmocnienie różnicowych sygnałów wejściowych jest znaczne (wyznaczone przez R_C/r_e).



Rys. 21

A może jeszcze coś się uda ulepszyć?

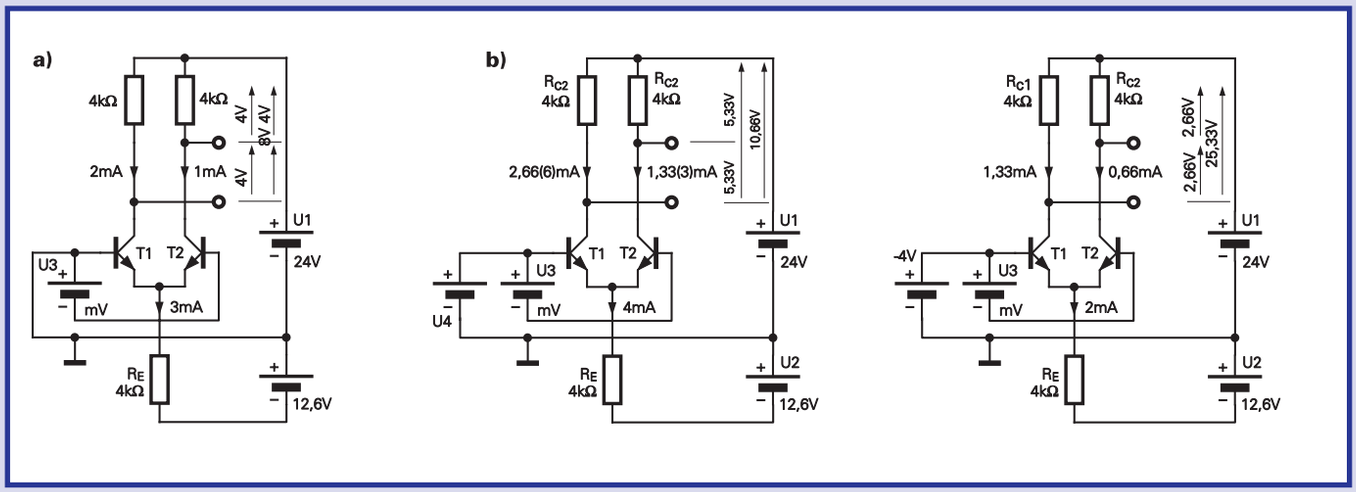
Ulepszajmy dalej - zwiększmy wzmocnienie przez zastosowanie w kolektorach źródeł prądowych zamiast rezystorów R_C (**rysunek 22**). Taki zabieg radykalnie zwiększy wzmocnienie (pod warunkiem, że dołączona oporność obciążenia będzie bardzo duża, ale to już inny problem).



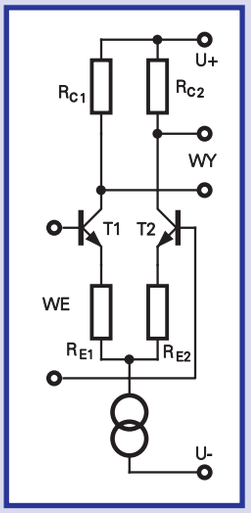
Rys. 22

W niektórych przypadkach nie zależy nam na dużym wzmocnieniu, a ważniejsza jest liniowość. Jak się na pewno domyślasz, wystarczy dodać rezystory w obwodach emiterów, a liniowość polepszy się kosztem wzmocnienia - zobacz **rysunek 23**.

Już chyba się przekonałeś, że to fajny układ ten wzmacniacz różnicowy. Ale to jeszcze nie koniec. Zmorą wszystkich omawianych wcześniej wzmacniaczy OC, OE, OB była zależność wielu klu-



Rys. 20



Rys. 23

czowych parametrów od temperatury.

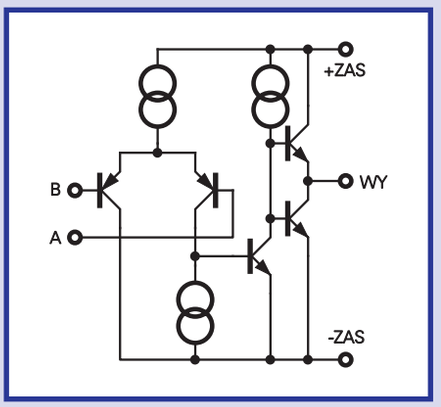
Załóżmy teraz, że we wzmacniaczu różnicowym wykorzystujemy dwa identyczne tranzystory, umieszczone tuż obok siebie na jednej płytce krzemu. Jednakowe są nie tylko wymiary geometryczne, ale także wszystkie parametry. Temperatura obu struktur też jest jednakowa. Co z tego?

Nie będziemy wchodzić w szczegóły. Generalnie temperatura wpłynie na niektóre parametry, niemniej w sytuacji, gdy tranzystory są jednakowe, wpływ na ostateczne właściwości wzmacniacza będzie niewielki.

Notujemy kolejną cenną właściwość pary różnicowej - znaczną niezależność parametrów od temperatury.

Oczywiście w rzeczywistości podane warunki (identyczne parametry tranzystorów, identyczna temperatura, idealnie źródło prądowe) nie są do końca spełnione i każdy realny wzmacniacz różnicowy nie jest doskonały. Jednak generalnie to właśnie wzmacniacz różnicowy otwiera drogę do budowy pożytecznych wzmacniaczy o właściwościach praktycznie niezależnych od temperatury i innych szkodliwych czynników.

Rysunek 24 pokazuje bardzo prosty przykład realizacji takiego wzmacniacza. Układ jest zasilany napięciem symetrycznym, ma wejście różnicowe (symetryczne) i wyjście niesymetryczne. Niewątpliwie ma bardzo duże wzmocnienie różnicowe... Chyba Ci nie przeszkadza, że w stopniu wejściowym zastosowałem tranzystory PNP, a nie NPN.



Rys. 24

Czy ten układ kojarzy Ci się z czymś? Ze wzmacniaczem z Elektora 6/99? Z każdym wzmacniaczem mocy?

Słusznie! Prawie każdy tranzystorowy wzmacniacz mocy audio zbudowany jest na takiej mniej więcej zasadzie.

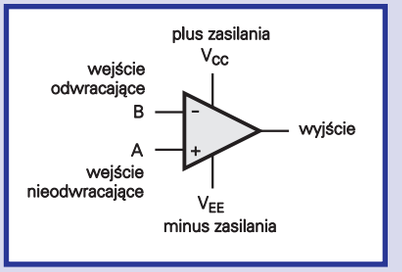
A może jeszcze Ci się z czymś kojarzy? Nie?

Mój Drogi, dokonaliśmy właśnie wspólnie fantastycznego wynalazku – na rysunku 24 mamy prawdziwy **wzmacniacz operacyjny**! Zauważ, że ma on tylko pięć końcówek: dwie końcówki zasilania (plus i minus, bez żadnej masy), wyjście i dwa wejścia (wejście różnicowe). Jeśli prześledzisz drogę sygnału, przekonasz się, że zwiększanie napięcia na wejściu A zwiększa napięcie wyjściowe. Wejście to nazywany wejściem nieodwracającym. Z kolei wzrost napięcia na wejściu B powoduje zmniejszanie się napięcia na wyjściu. Wejście B jest wejściem odwracającym.

Teraz wyobraź sobie, że ktoś wykonał taki wzmacniacz w postaci układu scalonego. Od tej chwili mniej ważne stają się szczegóły wewnętrzne - ogólne zasady działania każdego wzmacniacza operacyjnego są takie same. Zaczynamy go traktować jako czarną skrzynkę z dwoma wejściami, wyjściem i dwoma zaciskami zasilania. Rysujemy go w postaci jak na **rysunku 25**. Taki jest symbol wzmacniacza operacyjnego.

W rzeczywistości budowa wewnętrzna współczesnych wzmacniaczy operacyjnych jest daleko bardziej skomplikowana, niemniej ogólne podstawy budowy i działania są właśnie takie jak na rysunku 24. A tak na marginesie - mniej więcej w ten sposób zbudowany jest popularny wzmacniacz operacyjny z kostki LM358.

Jeśli nadążasz za mną, to właśnie poznałeś składowe



Rys. 25

cegiełki oraz podstawy działania wzmacniacza operacyjnego. Teraz nie pozostaje mi nic innego, tylko w najbliższym czasie zacząć tak długo oczekiwany cykl na ten temat. Ale cyklu o tranzystorach nie kończę. Listy nadsyłane w tej sprawie świadczą, że na łamach EdW powinny równolegle pojawiać się oba tematy. W najbliższym czasie zajmiemy się zarówno wzmacniaczami operacyjnymi, jak i tranzystorami.

Piotr Górecki