

Tranzystory dla początkujących

część 19

Para różnicowa

W tym numerze przygotowałem długo oczekiwaną niespodziankę. Zapoznaj się dokładnie z całym przedstawionym materiałem, bo jest to przepustka do nowych, fascynujących obszarów elektroniki.

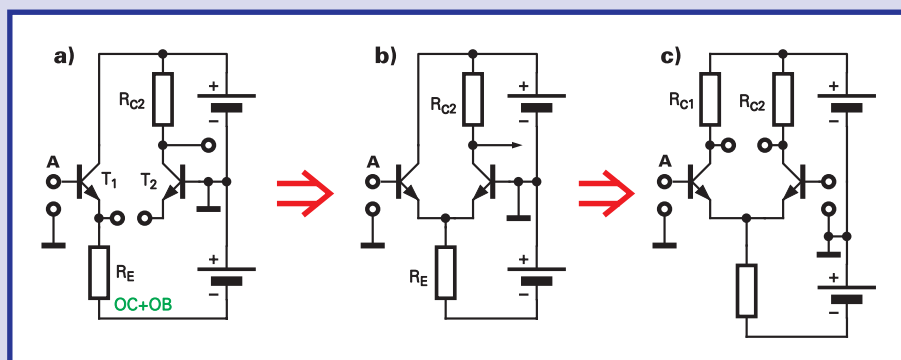
Wzmacniacz różnicowy

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

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



Rys. 17

w EdW 7/99. Wobec tego rezystancja wejściowa będzie niewielka, około

$$R_{we} = 2 \cdot \beta_{T1} \cdot r_e$$

Czyli tylko dwukrotnie większa niż w układzie OE.

Natomiast wzmocnienie jest dwukrotnie mniejsze i wynosi

$$K_u = R_{C2} / 2r_e$$

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 lub symetrycznym.

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 między masę a jedno wejście, tylko między dwa wejścia. Nie masz chyba wątpliwości, że sygnał wyjściowy jest tu pro-

Pierwsze kroki

porcjonalny 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 rozptył prądu "emiterowego" pomiędzy dwa tranzystory, a tym samym zmienia różnicowe napięcie wyjściowe.

Jasne?

A co wtedy, gdy na oba wejścia podamy takie same napięcie względem masy (lub zewrzymy je i podamy na oba jakieś napięcie zmienne)? Podajemy więc na zwarte wejścia napięcie wspólne. Przeanalizuj układ samodzielnie, pomierz prąd bazy. Pomoże Ci **rysunek 19** (przyjąłem takie

wartości napięć i rezystancji, żeby było łatwiej liczyć). Jakie będzie napięcie wyjściowe U_{wy} , gdy punkt A ze wrzesz do masy? A jakie, gdy podasz nań napięcie stałe +4V, a potem -4V? Policz to!

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 zero). 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 wspólnego będzie zauważalny. Ilustruje to **rysunek 20a, b, c**, gdzie to samo niewielkie różnicowe napięcie wejściowe U_3 (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 (U_3), jednak napięcie wspólne U_4 ma wpływ na różnicowe napięcie wyjściowe. Napięcie wyjściowe wyróżniłem na rysunku 20 innym kolorem. Już zapewne zdążyłeś zauważyć, że zmiany te wynikają ze zmian prądu I_E (i tym samym I_{C1} , I_{C2}). Co zrobić, by napięcie wspólne 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 ta-

ki sam i w konsekwencji napięcie wspólne zupełnie nie wpływa na napięcia wyjściowe - przeanalizuj to samodzielnie. Fachowo powiemy, że taki układ ma nieskończone wielki współczynnik tłumienia sygnału wspólnego. Ten **współczynnik tłumienia sygnału wspólnego** 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 wspólnych. Wtedy wzmocnienie sygnału wspólnego jest bliskie zero, natomiast wzmocnienie różnicowych sygnałów wejściowych jest znaczne (wyznaczone przez R_C/r_o).

A może jeszcze coś się uda ulepszyć?

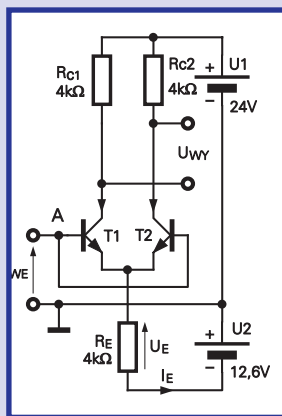
Ulepszajmy dalej - zwiększymy wzmocnienie przez zastosowanie w kolektorach źródeł prądowych zamiast rezystorów R_C (**rysunek 22**). Taki zabieg radykalnie zwiększy wzmocnienie (pod warunkiem, że dołączone oporność obciążenia będzie bardzo duża, ale to już inny problem).

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 -

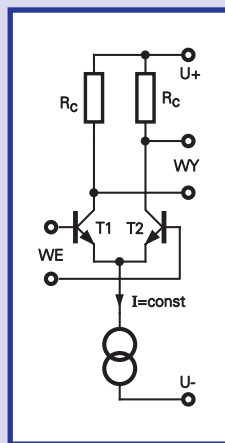
zobacz **rysunek 23**.

Już chyba się przekonałeś, że to fajny układ ten wzmacniacz różnicowy. Ale to jeszcze nie koniec. Zmora wszystkich omawianych wcześniej wzmacniaczy OC, OE, OB była zależność wielu kluczowych parametrów od temperatury.

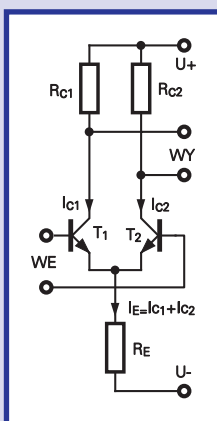
Założmy teraz, że we wzmacniaczu różnicowym wykorzystujemy dwa identyczne tranzystory, umieszczone tuż



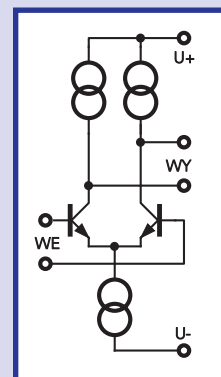
Rys. 19



Rys. 21

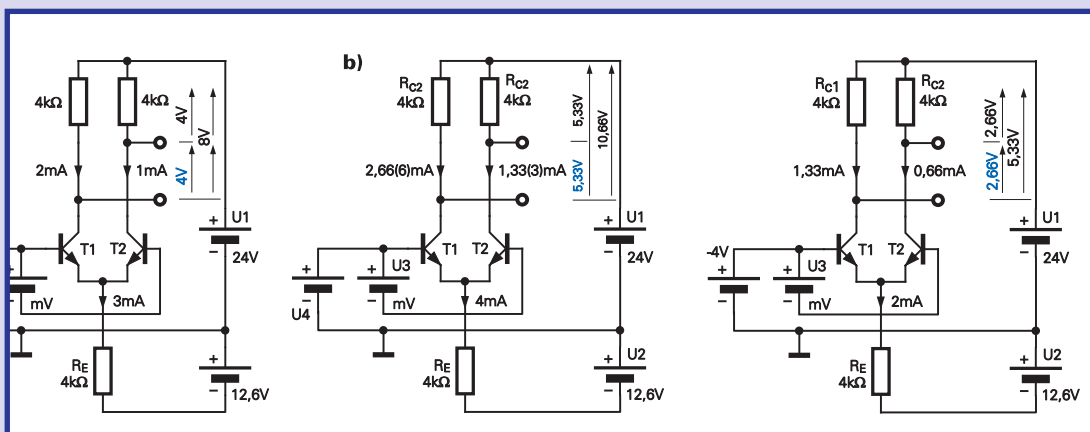


Rys. 18



Rys. 22

Rys. 20



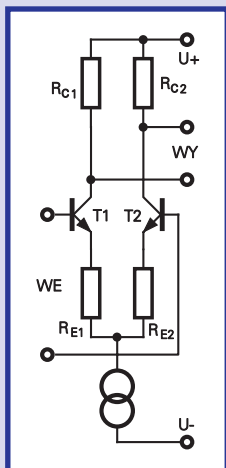
obok siebie na jednej płytce krzemu. Jednakowe są nie tylko wymiary geometryczne, ale także wszystkie parametry. Temperatura obu struktur też jest jednakowa. Co z tego?

Nie będziemy wchodzić w szczegóły. Generalnie temperatura wpłynie na niektóre parametry, niemniej w sytuacji, gdy tranzystory są jednakowe, jej wpływ na napięcie wyjściowe i inne parametry będzie niewielki.

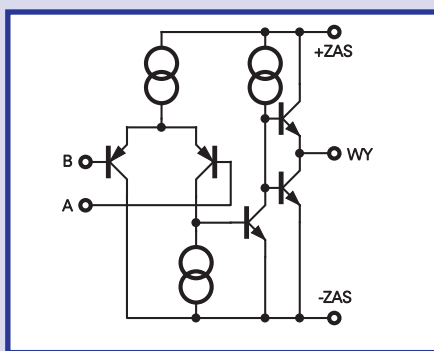
Notujemy kolejną cenną właściwość pary różnicowej - znaczną niezależność parametrów od temperatury.

Oczywiście w rzeczywistości podane warunki (identyczne parametry tranzystorów, identyczna temperatura, idealnie źródło prądowe) nie są do końca spełnione i żaden realny wzmacniacz różnicowy nie jest doskonały. Jednak generalnie to właśnie wzmacniacz różnicowy otwiera drogę do budowy użytecznych 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



Rys. 23



Rys. 24

nie przeszkadza, że w stopniu wejściowym zastosowałem tranzystory PNP, a nie NPN.

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

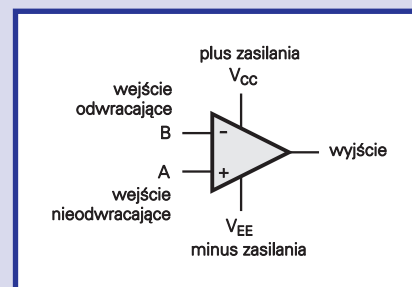
Słusznie! Prawie każdy tranzystorowy wzmacniacz mocy audio zbudowany jest na takiej mniej więcej zasadzie.

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 nazywamy **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 szcze-

gół wewnętrzne - ogólne zasady działania każdego wzmacniacza operacyjnego są takie same. Zaczynamy go traktować jako czarną skrzynkę z dwoma wejściami, wyj-



Rys. 25

ściem 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 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 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