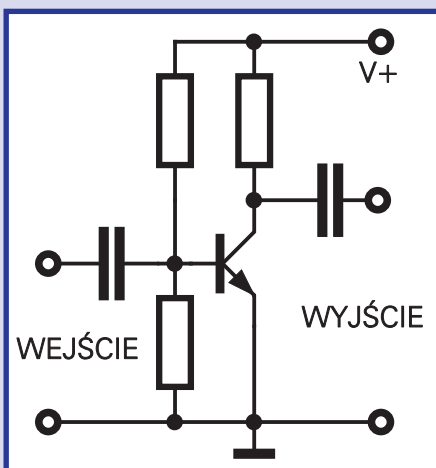


W tym odcinku zapoznasz się ze wzmacniaczem tranzystorowym w układzie wspólnego emitera. Podejmiemy do tematu inaczej niż szkolne podręczniki i okaże się, że występujące tu zależności wcale nie są trudne. Poznasz podstawowe informacje, które pozwolą Ci samodzielnie zaprojektować taki wzmacniacz. Nie znaczy to jednak, że w swych konstrukcjach powinieneś go często stosować. O ile układ ze wspólnym kolektorem (wtórnik emiterowy) jest stosowany bardzo często, o tyle wzmacniacz przebiegów zmiennych ze wspólnym emiterem rzadko bywa stosowany we współczesnych konstrukcjach. Zamiast niego wykorzystujemy wzmacniacze operacyjne. Nie można jednak być prawdziwym elektronikiem, nie znając podstawowych układów pracy tranzystora. Dlatego też dokładnie zapoznaj się z przedstawionym materiałem.

Z dotychczasowych opowieści o tranzystorze wiesz, że jest to twór kapryśny. Masz podstawy sądzić, że równie kapryśny jest wzmacniacz z tranzystorem w układzie wspólnego emitera, pokazany na **rysunku 1**, znany z podręczników. Masz świętą rację! Za chwilę sam się przekonasz, że taki "podręcznikowy" układ z rysunku 1 rzeczywiście jest kapryśny (i nigdy go nie stosujemy w praktyce).

Nie bój się jednak, mam dla Ciebie przyjemną niespodziankę. Zapoznanie z układem wzmacniacza o wspólnym emiterze (oznaczenie OE lub WE) rozpoczniemy od... przedstawionego w dwóch poprzednich odcinkach wzmacniacza ze wspólnym kolektorem, który już zdążyłeś polubić.

Na początek wyjaśnienie: w praktyce układ ze wspólnym emiterem będziesz stosował tylko do wzmacniania przebiegów zmiennych, więc nie będziemy zajmować się żadnymi stałoprądowymi wejściami wzmacniacza OE. Oczywiście tranzystor jest odpowiednio spolaryzowany i



Rys. 1



przebiegi zmienne występują na tle spoczynkowych napięć i prądów stałych.

Na **rysunku 2** do klasycznego wtórnika emiterowego (OC) dodałem w obwodzie kolektora rezystor  $R_C$  o rezystancji zdecydowanie (dziesięciokrotnie) mniejszej niż rezystancja  $R_E$ .

Czy obecność niewielkiego rezystora  $R_C$  coś zmieni? Nie! To nadal jest układ OC, bo sygnał wyjściowy odbieramy z emitera.

Powinieneś widzieć tu następującą kolejność: Właściwości wejścia określone są dokładnie tak, jak w układzie OC. Prąd  $I_E$  płynący przez  $R_E$  jest określony przez (stałe) napięcie bazy i rezystancję  $R_E$ . W układzie OE zupełnie nie zajmowaliśmy się obwodem kolektora. Teraz potrzebna jest tylko jedna informacja: jaki jest ten prąd kolektora?

Oczywiście! Możemy przyjąć, że jest on równy prądowi emitera,  $I_C = I_E$ .

Na razie pomińmy fakt, że prąd emitera jest odrobinę większy od prądu kolektora (o prąd bazy) – przyjmujemy, że prąd emitera i prąd kolektora są równe ( $I_C = I_E$ ), co przy wzmacnieniu prądowym powyżej 100 jest bardzo bliskie prawdy. To jest proste, prawda?

A więc przez  $R_C$  płynie prąd  $I_C = I_E$ . Na rezystorze  $R_C$  wystąpi więc jakiś spadek napięcia. Dotyczy to zarówno prądu stałego (spoczynkowego), jak i przebiegów zmiennych.

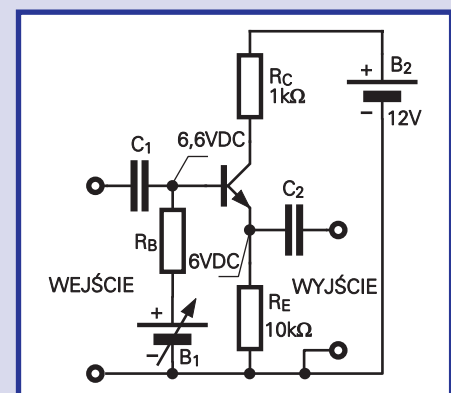
Wartość rezystora  $R_C$  możemy zwiększać, byleby spadek napięcia na nim nie był zbyt duży i by tranzystor się nie nasycił.

Zwiększmy więc wartość  $R_C$  by była równa  $R_E$ , ale aby tranzystor się nie nasycił, obniżymy napięcie baterii  $B_1$ , żeby stałe napięcie na emiterze wynosiło, na przykład 1/4 napięcia baterii  $B_2$ . Sytuację pokazuje **rysunek 3a**.

A jak będą wyglądać przebiegi zmienne? Podobnie jak w układzie OC, napięcie zmienne na emiterze będzie takie samo, jak na bazie (porównaj **rysunek 4b** w EdW 2/99 str. 34). A ponieważ rezystory  $R_E$  i  $R_C$  są równe – uważaj – spadki napięć na tych rezystorach też będą jednakowe! Przykładowe przebiegi w układzie z **rysunku 3a** znajdziesz na **rysunku 3b**. Zauważ, że  $U_{RC} = U_{RE}$ , bo  $I_C = I_E$  oraz  $R_C = R_E$ . Czy wszystko się zgadza? Przebiegi zmienne na emiterze i kolektorze mają taką samą wielkość, tyle że są "odwrócone" – fachowo mówiąc mają przeciwną fazę. Zauważ, że teraz mamy dwa wyjścia: możemy pobrać sygnał z kolektora, a nie tylko z emitera. I tym oto prostym sposobem dochodzimy do wzmacniacza OE, który na razie ma wzmacnienie 1. Jak zwiększyć wzmacnienie? Czy już się domyślasz?

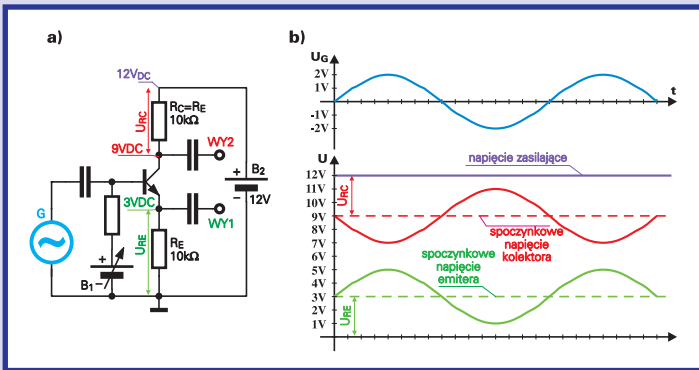
Mamy dwie drogi.

1. Zmniejszamy rezystancję  $R_E$ , a zwiększamy  $R_C$ . Żeby nie nasycić tranzystora musimy też zmniejszyć napięcie stałe na bazie, zmniejszając napięcie baterii  $U_{B1}$  (na razie nie zastanawiaj się nad tym, jakie powinno być napięcie baterii



Rys. 2

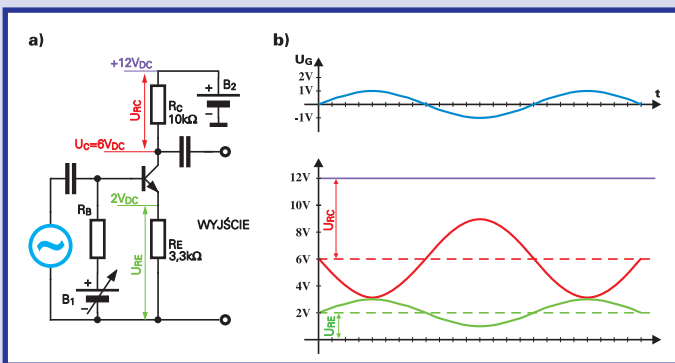
# Pierwsze kroki



Rys. 3

B1 – to nie jest istotne). Stosowny układ i przebiegi znajdziesz na **rysunku 4**. To jest już najprawdziwszy wzmacniacz OE. Zauważ, że napięcie zmienne na emiterze nadal jest równe zmiennemu napięciu wejściowemu. I nadal przez  $R_C$  płynie ten sam prąd, co przez  $R_E$  ( $I_C=I_E$ ). Ponieważ  $R_C$  jest teraz trzykrotnie większe od  $R_E$ , spadek napięcia na  $U_{RC}$  jest trzykrotnie większy niż na  $U_{RE}$ . Popatrz uważnie na rysunek 4. Czyli... nasz układ ma wzmocnienie równe 3. To nie przypadek – **wartość wzmocnienia określona jest przez stosunek  $R_C$  do  $R_E$** . Przeanalizuj to!

Ponieważ w sytuacji z rysunku 4 przez przypadek wyszło, że  $U_C = U_{RC}$ , możesz mieć pewne wątpliwości. Jak to jest z tymi napięciami? Czy może zmiana napięcia zasilania zmieni wzmocnienie?



Rys. 4

Na **rysunku 5a** pokazana jest sytuacja, gdy w układzie z rysunku 4 podwyższyśmy napięcie zasilające do 15V. Zauważ, że spadek napięcia na  $R_C$  ( $U_{RC}$ ) nadal wynosi 6V. Prąd kolektora nie zmienił się, bo cały czas jest równy prądowi emitera, a ten jest wyznaczony przez napięcie na bazie.

**Rysunek 5b** pokazuje sytuację, gdy obniżymy napięcie zasilające do 10V. Spoczynkowy spadek napięcia na rezystancji kolektorowej ( $U_{RC}$ ) nadal wynosi 6V, a na emiterowej ( $U_{RE}$ ) 2V. Napięcia emitera i kolektora, mierzone w stosunku do masy, różnią się tylko o 2V. Okazuje się, że jest tu mało "miejsca" na składową zmienną. W rezultacie tranzystor okresowo wchodzi w stan nasycenia (na-

się" i nie byłyby zniekształcone. W każdym razie sytuacja z rysunku 5b sygnalizuje istotny warunek poprawnej pracy wzmacniaczy OE – trzeba zapewnić dużo "miejsca" dla wzmacnianego przebiegu.

Już chyba widzisz, że najlepiej byłoby ustawić spoczynkowe napięcie kolektora w połowie między napięciem zasilania, a maksymalnym napięciem na emiterze.

Słusznie!

2. Teraz drugi sposób zwiększenia wzmocnienia. Żeby Ci nie mącić w głowie szczegółami, a pokazać główną ideę, wykorzystam układ z rysunku 3, który miał wzmocnienie równe 1. Aby zwiększyć wzmocnienie, do rezystora  $R_E$  z tego układu dodaję kondensator  $C_E$  o dużej pojemności i rezystor  $R_{E1}$ , o wartości 10kΩ. Nowy układ i przebiegi pokazane są na **rysunku 6**.

Zwróć uwagę – napięcia stałe są takie same jak na rysunku 3. Także tym razem napięcie zmienne na emiterze jest równe napięciu wejściowemu. Zauważ, że teraz dla pr z e b i e g ó w zmiennych oporność w emiterze jest wypadkową

rezystancją równoległego połączenia  $R_E$  i  $R_{E1}$  (i wynosi 5kΩ).

Czy jesteś przekonany, że ten układ rzeczywiście wzmacnia przebiegi zmienne dwukrotnie?

Najprościej rzecz biorąc, podobnie jak w układzie z rysunku 4, **także i tu wzmocnienie wyznaczone jest stosunkiem rezystancji kolektorowej**

napięcie między kolektorem a emiterem jest bliskie zeru) – na rysunku są to płaskie, sąsiadujące części obu przebiegów. Oczywiście, gdyby wzmacniane przebiegi były mniejsze, oba przebiegi "zmieściłyby

$R_C$  (10kΩ) do rezystancji w obwodzie emitera, która dla przebiegów zmiennych wynosi właśnie 5kΩ. Czy to Cię przekonuje?

Jeśli nie, to włączymy się w problem. Nadal kluczową sprawą jest to, że prąd emitera jest równy prądowi kolektora. Tylko teraz mamy dwie oddzielne sprawy: prądy i napięcia przebiegów stałych, oraz dla przebiegów zmiennych.

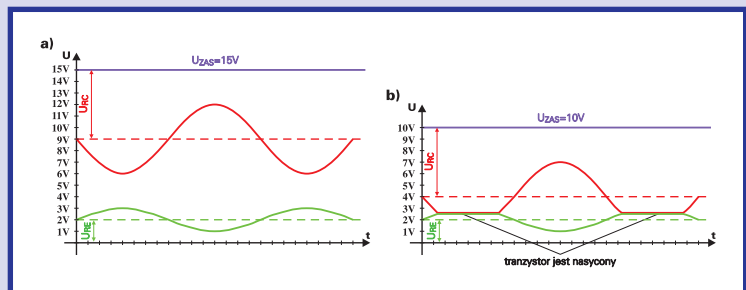
Stały prąd emitera jest nadal wyznaczony przez  $R_E$  (i napięcie stałe na bazie), a stałe napięcia spoczynkowe na  $R_E$  i  $R_C$  są równe – zobacz rysunki 3b i 6b.

Napięcie zmienne na emiterze cały czas jest równe napięciu wejściowemu (z generatora), a kondensator  $C_E$  dla przebiegów zmiennych stanowi zwarcie, więc napięcie zmienne na  $R_{E1}$  też jest równe napięciu na emiterze, czyli napięciu wejściowemu. Jeśli więc na  $R_{E1}$  występuje takie napięcie zmienne, przez rezystor ten musi także płynąć prąd zmienny.

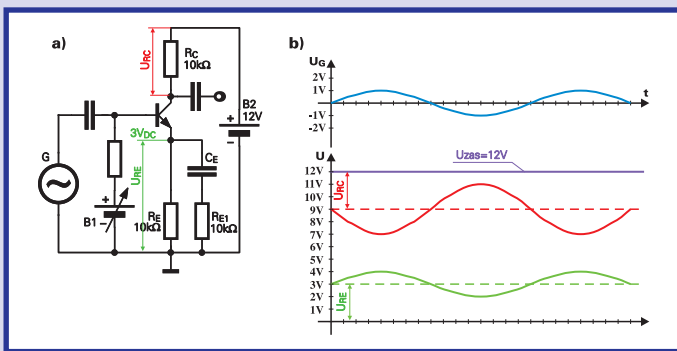
Tu trochę uproścę problem, żeby Ci nie mącić w głowie – ten prąd, a ściślej ta składowa zmienna skądś się musi wziąć – płynie z baterii B2 przez rezystor  $R_C$ , tranzystor, kondensator  $C_E$ , rezystor  $R_{E1}$  i dalej z powrotem do baterii. (Tylko dla zaawansowanych: Ściślej biorąc, kondensator  $C_E$  ładuje się w tym obwodzie, a rozładowuje w obwodzie  $R_E$ , R1, ale to szczegół, w tej chwili nieistotny.) Na **rysunku 7** możesz zobaczyć główną ideę – różnymi kolorami pokazałem Ci te dwie składowe prądu: jedna, płynąca przez  $R_E$  jest taka sama, jak w układzie z rysunku 3, druga związana jest z obwodem  $C_E$ ,  $R_{E1}$ . Sumują się one na rezystancji  $R_C$ . Właśnie dlatego napięcie na  $R_C$  jest większe niż napięcie na emiterze.

Mam nadzieję, że zrozumiałeś tę ideę. To na razie wystarczy. Nie chcę Cię wprowadzać w szczegóły i rozważać wszystkie możliwe przypadki i ewentualne ograniczenia. Musimy natomiast zająć się kolejną ważną sprawą.

Co z rezystancją wejściową?



Rys. 5



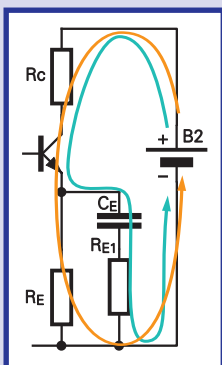
Rys. 6

## Rezystancja wejściowa

Wiesz, jak na dwa różne sposoby zwiększać wzmocnienie. Okazuje się jednak, że zwiększając wzmocnienie, zmniejszasz rezystancję wejściową tranzystora (na razie pomijamy wpływ  $R_B$  i rozważamy oporność samego tranzystora).

Wracamy do układu OC z rysunku 2. Jak w każdym układzie OC rezystancja wejściowa dla przebiegów zmiennych samego tranzystora jest  $\beta$ -krotnie (ściślej  $\beta+1$ -krotnie) większa niż rezystancja  $R_E$ . Dokładnie tak samo jest w układzie z rysunku 3.

W układzie z rysunku 4 zwiększyliśmy wzmocnienie, zmniejszając rezystancję  $R_E$  do 3,3k $\Omega$ . Uważaj! Nadal, podobnie jak w układzie OC, rezystancja wejściowa



Rys. 7

jest  $\beta$ -krotnie większa od  $R_E$ . Ale ponieważ rezystancja  $R_E$  jest trzykrotnie mniejsza, rezystancja wejściowa też jest trzykrotnie mniejsza.

To nie przypadek, bo wzmocnienie wynosi właśnie 3.

Podobnie jest w układzie z rysunku 5. Dwukrotne wzmocnienie uzyskaliśmy zmniejszając rezystancję emiterową dla przebiegów zmiennych, i rezystancja wejściowa jest  $\beta$ -krotnie większa od tej wypadkowej rezystancji emiterowej

$$(\beta * 5k\Omega).$$

I co, proste?

Występuje tu oczywista zależność: zmniejszając rezystancję emiterową zmniejszamy rezystancję wejściową tranzystora. Cóż, trudno. Coś za coś, nic za darmo: większe wzmocnienie to mniejsza rezystancja wejściowa dla przebiegów zmiennych. Najważniejsze jednak, że układ wzmacnia!

No i co? Wszystko poszło gładko, bez żadnych problemów! A Ty tak bałeś się

wzmacniacza OE. Tymczasem jest to aż tak beznadziejnie proste! Może jednak masz jakieś pytania?

Pytasz dlaczego w układzie z rysunku 3 nie zredukować  $R_E$  do zera, uzyskując układ jak na **rysunku 8a** lub prościej

– "podręcznikowy" układ z **rysunku 8b**?

Nigdy tego nie rób! Nie bądź zbyt chytry! Spróbuj odpowiedzieć na dwa pytania:

1. Czy przez zredukowanie oporności emiterowej dla przebiegów zmiennych do zera uzyskasz wzmocnienie nieskończenie wielkie?

2. Jaka będzie wtedy rezystancja wejściowa układu dla przebiegów zmiennych?

Słusznie uważasz, że wzmocnienie nie może być nieskończenie wielkie, a jeśli chodzi o rezystancję wejściową... nie bój się – nie będzie równa zeru. Kiedyś już to obliczaliśmy (w EdW 11/98 str. 67) i w tamtym przykładzie wyszło nam około 100 omów. A czy pamiętasz, że tamte rozważania wskazywały, iż rezystancja wejściowa nie jest stała, tylko zmienia się w zależności od prądu bazy i kolektora? Doszliśmy do wniosku, iż sygnał wyjściowy w najprostszym układzie wzmacniacza tranzystorowego będzie bardzo zniekształcony? Zobacz rysunki w EdW4/98 na str. 76, 79. Zwróć uwagę, że tamte rozważania tak naprawdę dotyczyły właśnie wzmacniacza OE i dotyczą również naszych układów z rysunku 8.

Mało tego! Przecież wtedy na stały prąd bazy i prąd kolektora będą mieć znaczny wpływ nawet maleńkie zmiany stałego napięcia na bazie! Porównaj **rysunek 6** w EdW 11/98. Zmiana stałego napięcia polaryzującego bazę o około 60mV spowodowałaby dziesięciokrotną zmianę wartości stałego prądu kolektora. Czyli tranzystor albo by się nasycił (napięcie kolektora bliskie masy, prąd ograniczony wartością  $R_C$ ), albo spadek napięcia na rezystorze kolektorowym byłby bardzo mały (napięcie kolektora bliskie dodatniemu

napięciu zasilania). W obu przypadkach układ nie mógłby prawidłowo wzmacniać przebiegów zmiennych, które przecież muszą występować "na tle" napięcia stałego (najlepiej około połowy napięcia zasilającego). Czyżbyś też zapomniał o wpływie temperatury na napięcie  $U_{BE}$  (-2,2mV/°C)?, w układzie z rysunku 8a.

Wzrost temperatury struktury tranzystora tylko o 8°C (przy niezmiennym napięciu bazy) zmieni prąd kolektora dwukrotnie, tym samym doprowadzi do nasycenia i uniemożliwi pracę wzmacniacza.

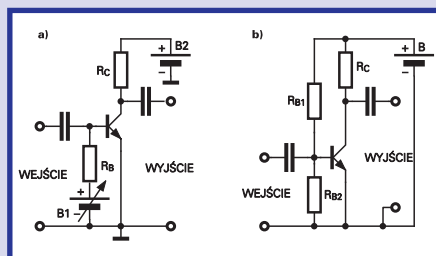
Co prawda obecność rezystancji  $R_B$  ( $R_{B1}$  i  $R_{B2}$ ) znacznie poprawia sytuację, jednak mimo wszystko stabilność cieplna i napięciowa układów z rysunku 8 jest bardzo słaba. Nie musisz rozumieć wszystkich szczegółów, zapamiętaj tylko podany właśnie wniosek.

Czy już zauważyłeś, że istnieje bardzo prosty sposób na zmniejszenie wpływu zmian temperatury i napięcia zasilającego? Oczywiście chodzi o obecność rezystora emiterowego  $R_E$ . Jeśli spoczynkowe napięcie stałe na  $R_E$  będzie wynosić choćby tylko 0,3V, wpływ zmian napięcia bazy i temperatury zostanie zredukowany do około 20% podanych przed chwilą wartości. Gdy napięcie stałe na  $R_E$  wyniesie 1,2V ten wpływ zmniejszy się dwudziestokrotnie. Nie musisz zapamiętywać tych szczegółów – musisz tylko wiedzieć, że czym większe napięcie stałe na  $R_E$ , tym spoczynkowy prąd kolektora mniej zależy od temperatury i wahań napięcia polaryzującego bazę. Inaczej mówiąc, zwiększanie wartości  $R_E$  czyni układ bardziej stabilnym, niezależnym od wielu czynników, w tym temperatury.

Oczywiście jak zwykle nie można przesadzić. Nadmierne zwiększanie rezystancji  $R_E$  zwiększa napięcie  $U_{RE}$  i ogranicza zakres zmian napięcia kolektora – porównaj rysunki 3b, 4b, 5b i 6b.

Jeśli to rozumiesz, właśnie skutecznie ominąłeś nudne podręcznikowe rozważania na temat sprzężenia zwrotnego w tranzystorowym układzie OE. Nie twierdź, że takie rozważania są niepotrzebne – może kiedyś wrócisz do nich. Twierdź tylko stanowczo, że próba tłumaczenia początkującym właściwości tranzystora za pomocą zawiłych rozważań i wzorów dotyczących różnych rodzajów sprzężenia zwrotnego, przynosi więcej szkody niż pożytku i niepotrzebnie ich stresuje.

Ty uzbrojony w świeżo zdobytą wiedzę, być może zaproponujesz, żeby pozostać przy stabilnym układzie z rysunku 6, a w celu zwiększenia wzmocnienia zredukować  $R_{E1}$  do zera, uzyskując układ pokazany na **rysunku 9a**. Świetnie! Zrobiłeś spory postęp! Czasami rzeczywiście stosujemy taki układ. Niekiedy stosujemy również układ z **rysunku 9b**. Dzięki dołączeniu

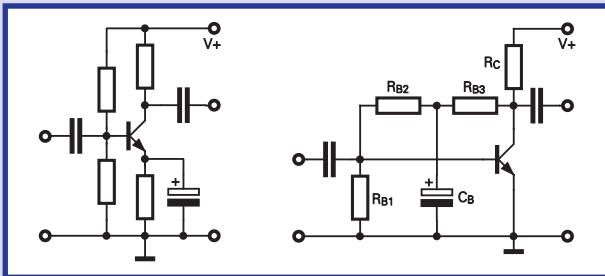


Rys. 8



## Pierwsze kroki

rezystora R1 do kolektora, a nie do dodatniego bieguna zasilania, znacznie poprawia się stabilność stałoprądowego punktu pracy. Jeśli z jakichkolwiek powodów (np. zmiany temperatury) prąd stały kolektora wzrośnie, to napięcie kolektora obniży się, i tym samym obniży się napięcie na bazie. Spowoduje to zmniejszenie prądu kolektora. W praktyce wahania stałego napięcia kolektora pod wpływem zmian temperatury nie będą większe niż 1V – wynik zupełnie wystarczający do wielu zastosowań. Obliczanie wartości elementów nie jest trudne. Zwykle chcemy, żeby stałe napięcie na kolektorze było równe połowie napięcia zasilającego



Rys. 9

( $U_{RC}=0,5U_{zas}$ ). Zakładamy jakiś prąd kolektora (zwykle od 1mA do kilku mA) i obliczamy wartość  $R_C = 0,5U_{zas} / I_C$

Prąd dzielnika  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  powinien wynosić około  $0,1I_C$ , by był znacznie większy od prądu bazy. Napięcie na rezystorze  $R_{B1}$  będzie wynosić około 0,6V.

$$\text{Stąd } R_{B1} = 0,6V / 0,1I_C = 6V / I_C$$

Ponieważ suma napięć na  $R_{B2}$  i  $R_{B3}$  ma wynosić  $0,5U_{zas} - 0,6V$ , a prąd dzielnika wynosi  $0,1I_C$  (pomijamy prąd bazy), więc  $(R_{B2}+R_{B3}) = (0,5U_{zas} - 0,6V) / 0,1I_C$

Zamiast przeprowadzać obliczenia, można przyjąć  $R_2=R_3=5R_C$ , a wartość  $R_{B1}$  dobrać eksperymentalnie, by napięcie na kolektorze wynosiło  $0,5U_{zas}$ .

Do zastosowań audio pojemność kondensatora (elektrolitycznego CB) może wynosić 100 $\mu$ F.

Zauważ, że duży kondensator CB dla sygnałów zmiennych stanowi zwarcie. Tym samym nie przepuszcza zmiennych sygnałów (sprężenia zwrotnego) z kolektora na bazę. Dzięki temu dla przebiegów zmiennych układ ma duże wzmocnienie, ale małą rezystancję wejściową i duże zniekształcenia. Natomiast spoczynkowy (stałoprądowy) punkt pracy jest stabilizowany dzięki (silnemu ujemnemu) sprzężeniu zwrotnemu z kolektora na bazę.

Oczywiście w układach z rysunku 9 można dodać niewielki rezystor emiterowy, by kosztem zmniejszenia wzmocnienia zwiększyć rezystancję wejściową i poprawić liniowość.

I wychodzi na to, że w praktyce najczęściej będziemy stosować układ pokazany na **rysunku 10**. W następnym odcinku

wrócimy do tego tematu. Ale wcześniej kolejna ogromnie ważna sprawa.

## Oporność wyjściowa wzmacniacza OE

Z dotychczasowych rozważań wynika niewzruszająco prosta zależność: zwiększając wzmocnienie, zmniejszamy rezystancję wejściową. A zmniejszanie rezystancji wejściowej jest istotną wadą.

Czy jest to nieuniknione?

Może zaproponujesz po prostu, by zwiększyć wszystkie rezystancje, na przykład dziesięciokrotnie. Jeśli wszystkie rezystancje wzrosną w takim samym stopniu, napięcia w układzie nie powinny się zmienić – zmniejszą się tylko prądy (ale to chyba dobrze, bo układ będzie zużywał mniej energii).

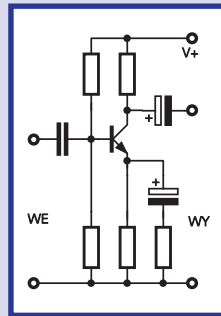
Rzeczywiście, zwiększenie rezystancji (w tym rezystancji w emiterze) korzystnie zwiększy rezystancję wejściową.

Zwiększajmy więc...

Czy już widzisz problem? Nie?

To przeanalizuj podany przykład.

Na **rysunku 11a** pokazano fragment wzmacniacza tranzystorowego. Załóżmy, że bez zewnętrznego obciążenia, na wyjściu występuje napięcie sinusoidalne 1kHz o wartości skutecznej 2V. Co się stanie, jeśli do wyjścia dołączymy rezystor obciążenia o rezystancji 220 $\Omega$ , jak pokazano na **rysunku 11b**?



Rys. 10

1. Czy zmieni się wartość zmiennego napięcia wyjściowego?

2. Czy zmieni się napięcie stałe na kolektorze tranzystora?

3. Czy pojawią się zniekształcenia sygnału sinusoidalnego?

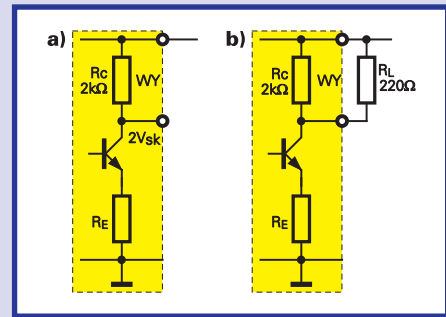
4. Czy zmieni się częstotliwość sygnału?

Spróbuj odpowiedzieć sam!

Słusznie! Dodanie zewnętrznego obciążenia zmniejsza wypadkową rezystancję dołączoną do źródła prądowego, jakim jest obwód kolektora. Zgodnie z prawem Ohma

$$U = I * R$$

Czym mniejsza dołączona rezystancja, tym mniejsze napięcie wyjściowe. Prąd kolektora się nie zmienił, natomiast rezystancja obciążenia zmniejszyła się z 2k $\Omega$  do oko-



Rys. 11

ło 200 $\Omega$ . A więc spadek napięcia na rezystorze  $R_C$  zmniejszył się dziesięciokrotnie, czyli napięcie zmienne na kolektorze zmniejszyło się dziesięciokrotnie. Natomiast napięcie stałe na kolektorze, mierzone względem masy, zwiększyło się. Nie pojawiły się zniekształcenia, ani nie zmieniła się częstotliwość.

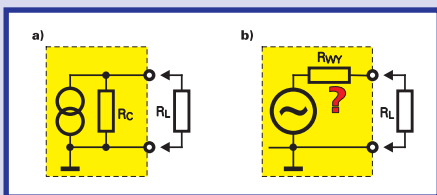
Tak na marginesie - te 200 $\Omega$  to wypadkowa rezystancja równoległego połączenia rezystancji 2k $\Omega$  i 220 $\Omega$ . Ściśle biorąc, wynik obliczeń to 198,2 $\Omega$  - ale w elektronice, inaczej niż w szkolnej matematyce, nie musimy wykonywać idealnie precyzyjnych obliczeń, choćby dlatego, że rzeczywiste elementy mają znaczny rozrzut parametrów, przykładowo tolerancja typowych rezystorów wynosi 5...10%, a precyzyjne rezystory o tolerancji lepszej niż 1% są dla amatorów praktycznie nie do zdobycia. Dlatego zaokrąglenie wartości rezystancji obliczonej w tym przykładzie o mniej niż pół procenta nie ma najmniejszego znaczenia.

A teraz wyobraź sobie, że dziesięciokrotnie zwiększyłeś wszystkie rezystancje w układzie. Wszystkie prądy zmniejszą się dziesięciokrotnie. Bez zewnętrznego obciążenia napięcie wyjściowe (na rezystorze  $R_C$  o wartości 20k $\Omega$ ) nadal jest równe 2Vsk. Ale jeśli teraz do wyjścia dołączysz rezystancję obciążenia równą 220 $\Omega$ , to...

No właśnie – ponieważ rezystancja obciążenia zmniejszy się z 20k $\Omega$  do 217 $\Omega$ , a prąd kolektora jest teraz dziesięciokrotnie mniejszy, napięcie wyjściowe drastycznie spadnie około 92 razy z 2Vsk do 21,7mV!

Czy teraz już wiesz, dlaczego zwiększanie wszystkich rezystancji w układzie (w tym rezystancji w kolektorze i emiterze) nie rozwiązuje problemu. Chcieliśmy tym zwiększyć rezystancję wejściową i zwiększyliśmy. Niestety, okazało się, że po dołączeniu obciążenia napięcie wyjściowe niedopuszczalnie się zmniejszyło. Okazuje się, że nasz wzmacniacz w układzie OE ma dużą rezystancję wyjściową.

Co prawda my zwykle traktujemy obwód kolektora jako źródło prądowe pracujące na obciążenie  $R_C$  (sytuację dla przebiegów zmiennych pokazuje **rysunek 12a**),



Rys. 12

ale śmiało możemy narysować schemat zastępczy wzmacniacza OE w bardziej zrozumiałej postaci, ze źródłem napięciowym i szeregową rezystancją wyjściową jak na **rysunku 12b**. Nasz wzmacniacz zachowuje się tak, jakby na wyjściu umieszczono jakąś szeregową rezystancję – właśnie jego rezystancję wyjściową. Oczywiście po dołączeniu zewnętrznego obciążenia napięcie wyjściowe zmniejszy się. Czym większa będzie wewnętrzna rezystancja wyjściowa  $R_{wy}$  w stosunku do rezystancji obciążenia  $R_L$ , tym napięcie wyjściowe będzie mniejsze.

A jaka jest wartość rezystancji wyjściowej w układzie OE? Nie będziemy się rozdrabniać, jeśli chcesz, sprawdź sam – rezystancja wyjściowa układu OE jest równa rezystancji opornika  $R_C$  umieszczonego w kolektorze.

To zupełnie inaczej niż w układzie wspólnego kolektora, gdzie (przy niezbyt dużych sygnałach) dołączenie rezystancji obciążenia  $R_L$  przez kondensator praktycznie nie zmieniało zmiennego napięcia wyjściowego. Czyli rezystancja wyjściowa była bardzo mała. Skąd taka różnica?

Tam była inna sytuacja – napięcie (stałe i zmienne) na emiterze było wymuszone przez napięcie na bazie. Tu masz praktyczny przykład właściwości źródła prądowego. Napięcie na wyjściu jest wynikiem przepływu prądu przez obciążenie kolektorowe. Czyli wszystko zależy od oporności w obwodzie kolektora. Zauważ, że decydujący wpływ na wzmocnienie napięciowe ma wypadkowa oporność (impedancja) obciążenia. Do tego wątku wrócimy w następnym odcinku.

Tymczasem przeanalizujemy kolejny przykład. Wzmacniacz jest ten sam co na rysunku 11, napięcia stałe i zmienne bez obciążenia też takie same. Tylko teraz zewnętrzny rezystor obciążenia ( $220\Omega$ ) jest dołączony nie wprost, tylko przez kondensator o bardzo dużej pojemności. Wygląda to jak na **rysunku 13a** lub **13b**. Czy sposób dołączenia obciążenia coś zmienia? Oczywiście nie! Dla przebiegów zmiennych zupełnie nie ma różnicy, czy obciążenie podłączone jest do plusa zasilania czy do masy – przecież dla sygnałów zmiennych szyna zasilania to to samo co obwód masy.

Jeśli tak, to odpowiedź na pytania:

1. Czy zmieni się wartość zmiennego napięcia wyjściowego?

2. Czy zmieni się napięcie stałe na kolektorze tranzystora?

Odrobinę trudniejsze, prawda? Kondensator separujący dla przebiegów zmiennych stanowi zwarcie, dla stałych stanowi przerwę. Już wiesz:

1. Napięcie stałe na kolektorze tranzystora nie zmieniło się, bo wskutek obecności kondensatora rezystancja dla prądu stałego widziana od strony kolektora nadal jest równa  $2k\Omega$ .

2. Wartość napięcia zmiennego powinna się zmniejszyć do  $0,2V_{sk}$ , bo dla prądów zmiennych rezystancja obciążenia widziana od strony kolektora zmniejszyła się tak samo jak w poprzednim przykładzie z  $2k\Omega$  do  $200\Omega$ .

Ma to bardzo ważne konsekwencje praktyczne.

Przypuśćmy, że zaprojektowałaś oszczędny wzmacniacz z **rysunku 14a** (przypuśćmy, że rezystancje  $R_1$  i  $R_3$  mają mieć po  $430k\Omega$ ), który jak łatwo obliczyć, ma wzmocnienie równe 20 razy. To trochę za mało do Twoich celów, więc do jego wyjścia dołączasz drugi taki sam stopień wzmocnienia. Układ wygląda jak na **rysunku 14b**. Czy wypadkowe wzmocnienie wyniesie  $20 \times 20 = 400$  razy?

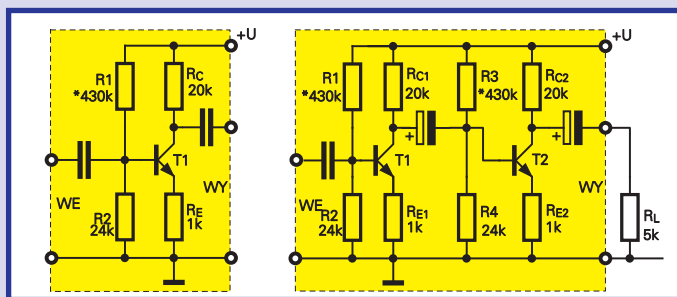
Po stokroć nie! Zrozum to i zapamiętaj raz na zawsze. Niedoświadczeni elektronicy bardzo często zapominają o wpływie oporności wejściowej i wyjściowej we wzmacniaczu OE. Zaczniemy od końca. Wzmocnienie wzmacniacza z tranzystorem T2 będzie równe 20 ( $R_{C2}/R_{E2}$ ) tylko wtedy, gdy wzmacniacz nie będzie obciążony, a praktycznie wtedy, gdy zewnętrzne obciążenie  $R_L$  będzie zdecydowanie większe niż  $R_{C2}$ . Po obciążeniu wzmocnienie będzie wyznaczone stosunkiem wypadkowej rezystancji kolektorowej i  $R_{E2}$ , czyli wyniesie  $(R_{C2} \parallel R_L) / R_{E2}$ . Możesz obliczyć, że drugi stopień będzie miał wzmocnienie równe 4.

Ale to nie koniec. Oblicz, jaka jest oporność wejściowa  $R_{we2}$  wzmacniacza z

tranzystorem T2. Nie musisz liczyć dokładnie, wystarczą wartości przybliżone. Przy założeniu, że  $\beta=100$  i  $R_{E2}=1k\Omega$  rezystancja samego tranzystora wynosi około  $100k\Omega$ , a po uwzględnieniu rezystancji polaryzujących  $R_3$  i  $R_4$  wypadkowa rezystancja wejściowa wynosi około  $20k\Omega$ .

Tym samym - uważaj – obciążeniem tranzystora T1 będzie nie tylko rezystor  $R_{C1}$ , ale rezystancja równoległego połączenia  $R_{C1}$  ( $20k\Omega$ ) i obliczonej właśnie rezystancji wejściowej następnego stopnia (około  $20k\Omega$ ). Obciążenie w kolektorze będzie więc mieć około  $10k\Omega$ , czyli uwzględniając wartość  $R_{E1}$  wzmocnienie pierwszego stopnia będzie równe nie 20, tylko 10.

Przy podanych wartościach okazało się, że wzmocnienie pierwszego stopnia wyniesie 10 razy, wzmocnienie drugiego 4 razy, czyli wypadkowe wzmocnienie zamiast spodziewanego 400 razy wyniesie jedynie 40 razy.



Rys. 14

W zasadzie to jeszcze nie wszystko. Cały układ ma rezystancję wejściową około  $20k\Omega$ , co może być istotnym obciążeniem dla źródła sygnału i wtedy wypadkowe wzmocnienie będzie jeszcze mniejsze.

Przeanalizuj dokładnie podany przykład. Czy teraz już dokładnie rozumiesz, że nie wolno zapominać o rezystancji wyjściowej i wejściowej wzmacniacza OE?

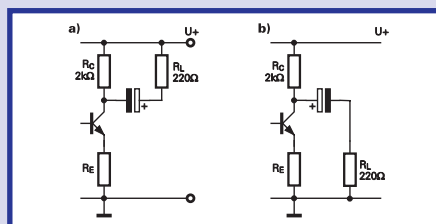
Umęczyłem Cię zależnościami występującymi we wzmacniaczu ze wspólnym emiterem. Co z tego koniecznie musisz zapamiętać?

Najważniejsze są następujące wnioski:

1. **Zwiększanie wzmocnienia następuje kosztem zmniejszania rezystancji wyjściowej**
2. **Rezystancja wyjściowa jest równa rezystancji  $R_C$  umieszczonej w obwodzie kolektora.**

W następnym odcinku zaprojektujemy też wspólnie dwa wzmacniacze OE. A ponieważ wzmacniacz OE nadal kryje pewne tajemnice, podam Ci kilka dalszych ciekawych informacji.

Piotr Górecki



Rys. 13