

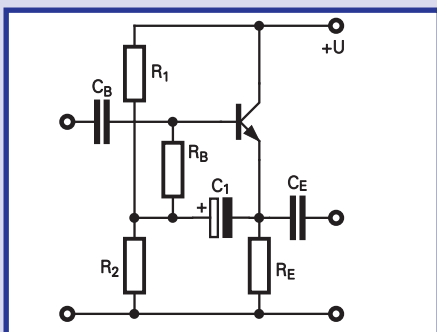


W tym odcinku podam Ci garść dalszych istotnych informacji na temat wzmacniacza ze wspólnym kolektorem.

Skrajności

Teraz już wiesz bardzo dużo o wtórniku emiterowym, czyli układzie ze wspólnym kolektorem.

Czy jednak uda się uzyskać oporność wejściową rzędu kilku megaomów? Czy na przykład starannie dobrany układ z rysunku 7 (w poprzednim numerze EdW), z selekcyonowanym tranzystorem o wzmacnieniu 1000, indywidualnie dobranymi rezystorami $R_B=1,2M\Omega$, $R_E=6,0k\Omega$ nie będzie miał rezystancji wejściowej równej $1M\Omega$, i czy tym samym nie będzie się nadawał na wejście kanału oscyloskopu, który planujesz zbudować? Niestety, muszę cię rozczarować!



Rys. 12

W naszych rozważaniach upraszczaliśmy co się da, by wyciągnąć ogólnie wnioski. Pominęliśmy na przykład wszelkie pojemności wewnętrzne tranzystora. Tymczasem te pominięte czynniki spowodowałyby, że przy wysokich częstotliwościach i dużych rezystancjach nasz układ mógłby w pewnych warunkach stać się... generatorem – wzbudziłby się na wysokich częstotliwościach. Zapomnij więc o wtórniku emiterowym, mającym jednocześnie wielką oporność wejściową i przenoszącym szerokie pasmo częstotliwości. Możesz spełnić tylko jeden z tych warunków. Przy niewielkich wartościach rezystancji R_E pasmo przenoszenia wtórника sięgnie kilkuset megaherców! Ale za to oporność wejściowa będzie stosunkowo mała

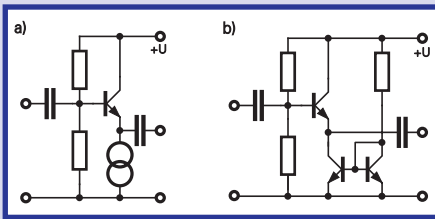
Z kolei układ z rysunku 12 ma bardzo dużą oporność wejściową - przez zastosowanie kondensatora C_1 napięcie zmienne w punkcie połączenia R_1 , R_2 i R_B jest praktycznie równe napięciu wejściowemu i dzięki temu oporność wejściowa jest wielokrotnie większa niż wartość rezystora R_B . Może ci się to wyda dziwne, ale tak jest – jeśli cały czas za mną nadążasz, sam spróbuj zrozumieć dlaczego. Podpowiem tylko: wypadkowa oporność jest stosunkiem (zmiennego)

napięcia wejściowego do (zmiennego) prądu wejściowego i gdyby (zmienną) napięcie na emiterze było idealnie takie samo jak na bazie, układ miałby oporność wejściową nieskończenie wielką. Wykorzystuje się tu sposób, nazywany bootstrap. Słowo bootstrap nie ma dobrego polskiego odpowiednika - znaczy mniej więcej tyle, co podciąganie się do góry przez ciągnięcie za własne sznurówki lub za włosy. W praktyce układ z rysunku 12 może przysparzać kłopotów w zakresie wyższych częstotliwości i należałoby ograniczyć pasmo przenoszenia. To oczywiście jest zadanie dla bardziej zaawansowanych, którzy nie zdziwią się, usłyszawszy, że układ z rysunku 12 może mieć w pewnych warunkach ujemną (!) rezystancję wejściową.

Problemy, problemy, problemy

Przy okazji leciutko "potrącę" pewien ważny, a bardzo trudny temat. Z powyższych rozważań wynika, iż pomijane w obliczeniach subtelne właściwości tranzystora mogą stać się powodem ogromnych kłopotów, polegających najczęściej na wzbudzeniu się układów na wysokich częstotliwościach. Przyczyny samowzbudzenia układu mogą być

Pierwsze kroki



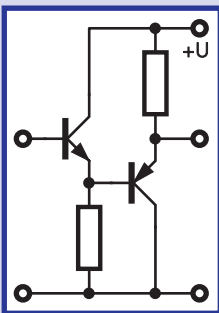
Rys. 13

różne, na przykład błędnie zaprojektowana płytka drukowana, czy niewłaściwe prowadzenie przewodów połączeniowych. Ale niektóre problemy mają źródło w tych pomijanych parametrach tranzystora, głównie pojemnościach.

Albo już spotkałeś, albo spotkasz układy, gdzie na wyprowadzenie bazy nakładany jest mały koralik ferrytowy. To nie żaden talizman – w ten sposób wprowadza się w obwód bazy bardzo, bardzo małą indukcyjność, i właśnie to chroni w pewnych warunkach przed oscylacjami. W innych układach spotkasz niewielki rezystor (10...100Ω) włączony szeregowo w obwód bazy. Na pierwszy rzut oka tak mała rezystancja nie ma żadnego znaczenia. Istotnie, dla prądu stałego i przebiegów małej częstotliwości nie ma, ale chroni przez samowzbudzeniem na wysokich częstotliwościach.

W uproszczeniu możesz to sobie wyobrazić, że dla wysokich częstotliwości wyprowadzenie bazy jest nie tylko wejściem, ale w pewnym sensie wyjściem, dlatego zachowanie tranzystora zależy wtedy od oporności obwodów bazy. Nie jest o żadną przesadą – odszukaj w EdW 11/98 **rysunek 4** na stronie 65 i przekonaj się, że jedną z przyczyn są pojemności, przez które sygnał z wyjścia wraca na wejście, czyli właśnie na bazę.

Początkujący zazwyczaj uważają, że skuteczną metodą na problemy z samowzbudzeniem jest ograniczenie od góry pasma przenoszenia przez dodanie niewielkich pojemności zwierających sygnały w.cz. do masy. Czasem to rzeczywiście pomaga, ale niekiedy jeszcze pogarsza sprawę, właśnie ze względu na omówione zjawiska. Dlatego nie ma uniwersalnych, prostych recept na wszystkie problemy z samowzbudzeniem wzmacniaczy. Przecież nawet tak zwane tranzystory małej częstotliwości mają częstotliwość graniczną rzędu 150...500MHz. Przy tak dużych częstotliwościach zwykły kawałek drutu to znacząca induk-



Rys. 14

cyjność, a zbyt mały odstęp między ścieżkami to znacząca pojemność. Przy takich częstotliwościach najwykleszy rezystor może zachowywać się jak indukcyjność, albo jak pojemność! Tak! A kondensator może zachowywać się jak indukcyjność albo rezystancja, choćby ze względu na indukcyjność wyprowadzeń czy straty dielektryka.

Co z tego wynika?

Żeby nie natknąć się na bardzo przykre niespodzianki, z którymi sobie nie poradzisz, nie zaczynaj od prób zaprojektowania jakichś wyrafinowanych wzmacniaczy tranzystorowych. Pozostaw to ludziom, którzy mają duże doświadczenie w tym zakresie. Ty na razie zdobywaj takie doświadczenie, zaczynając od układów najprostszych, nie stosując elementów o ekstremalnych wartościach i nie próbując "wyduścić" z tranzystora wszystkiego, co wydaje ci się możliwe. Wtedy nie napotkasz tych koszmarnych problemów i pomału, ale bezstresowo będziesz wgrzyzał się w ten temat.

Tylko dla ciekawskich

Podane informacje, dotyczące układu OC w zupełności wystarczą na początek elektronicznej kariery. Dla ciekawskich i bardziej zaawansowanych mam jeszcze kilka szczegółów. Zupełnie początkujący mogą spokojnie pominąć ten śródtytuł.

Omawiając działanie wtórnika założyliśmy w uproszczeniu, że spadek napięcia baza-emiter tranzystora jest stały i wynosi około 0,6V. W rzeczywistości ten spadek napięcia zależy od prądu bazy – porównaj rysunek 6 w EdW 11/98 str. 66. Prąd bazy zależy z kolei od prądu emitera, a ten w sumie od napięcia, zarówno stałego, jak i od wielkości przebiegu zmiennego. Czym większy sygnał zmienny, tym większe zmiany napięcia baza-emiter tranzystora.

I co z tego?

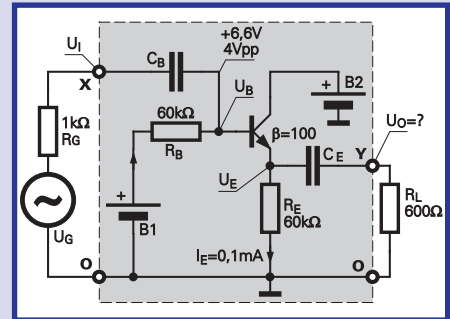
Po pierwsze spowoduje to, że zmienne napięcie na wyjściu (emiterze) będzie nieco mniejsze niż napięcie wejściowe (na bazie). To znaczy, że wtórnik emiterowy ma wzmocnienie nieco mniejsze od jedności. Nie jest to problemem, bo w praktyce wynosi ono zwykle około 0,99 - czyli mniejszy sygnał, tym jest bliższe jedności.

Po drugie, napięcie baza-emiter nie jest liniowo zależne od prądu bazy – jak wiesz, jest to zależność logarytmiczna. Powoduje to pewne niewielkie zniekształcenia nieliniowe sygnału, tym mniejsze, im mniejszy jest sygnał zmienny. W ogromnej większości przypadków takie zniekształcenia spokojnie pomijamy, ale gdybyś budował jakiś superprecyzyjny wzmacniacz czy przedwzmacniacz

o zniekształceniach rzędu tysięcznych części procenta, nie stosuj takich zwykłych wtórników.

Wspomniane dwie wady zwykłego wtórnika można wyeliminować pracując ze stałym prądem bazy (i stałym prądem emitera). Jak?

Wystarczy zastosować obciążenie w postaci źródła prądowego, jak na **rysunku 13a**. Na **rysunku 13b** możesz zobaczyć praktyczną realizację takiego bardziej precyzyjnego wtórnika. Dziś rzadko stosujemy takie rozwiązania, bo w zakresie niskich częstotliwości do, powiedzmy, 100kHz, stosuje się precyzyjne wtórnik zbudowane w oparciu o jakikolwiek wzmacniacz operacyjny. Jeśli ci się chce, zastanów się, jak na parametry wtórnika wpływa obecność źródła prądowego, które dla przebiegów zmiennych ma bardzo dużą oporność – co oznaczają, iż rezystancja R_E z rysunku 4 ma dla przebiegów zmiennych pomijalnie dużą war-



Rys. 15

tość, rzędu co najmniej kilkudziesięciu kiloomów. Jak to wpłynie na transformację impedancji?

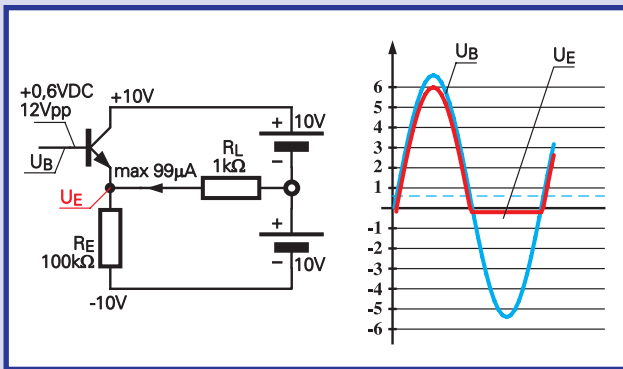
To jeden szczegół dla ciekawskich. Teraz drugi.

Dowiedziałeś się, że napięcie stałe na wyjściu (emiterze) różni się od napięcia na bazie o około 0,6V. A jak to jest przy zmianach temperatury? Oczywiście napięcie to zmienia się, i to znacznie, ze współczynnikiem około $-2,2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Tymczasem w pewnych sytuacjach, gdy wtórnik ma przenosić nie tylko sygnały zmienne, ale także stałe, powinien być stabilny pod względem termicznym. Czy to możliwe?

Rozwiązanie jest proste: zastosowanie układu z **rysunku 14** zapewnia, że napięcie wyjściowe jest równe napięciu wejściowemu, a wpływ zmian temperatury radykalnie się zmniejsza, zwłaszcza gdy tranzystory są podobnego typu, pozostają w jednakowej temperaturze, a prądy emiterów są równe.

Teraz trzeci szczegół.

Poprzednie wyliczenia pokazały czarno na białym, że oporność wyjściowa wtórnika jest znacznie mniejsza niż oporność



Rys. 16

wyjściowa źródła sygnału. Czy zauważyłeś, że zwiększenie rezystancji R_E wydaje się korzystne? Przy okazji zmniejszymy radykalnie pobór prądu i straty mocy. Przemyśl to!

Czy przykład ze źródłem prądowym w obwodzie emitera (rysunek 13) przekonał cię, że zwiększanie R_E jest uzasadnione?

Jeśli tak, popatrz na **rysunek 15**. W układzie z rysunku 4 zwiększyliśmy rezystancje R_B i R_E do $60k\Omega$. Niby wszystko jest w porządku. Jaka będzie rezystancja wejściowa całego wtórnika dla przebiegów zmiennych? Z podanych wyliczeń wynikałoby, że wynosi około $30k\Omega$, bo tym razem wpływ R_E jest niewielki i decydujący wpływ ma rezystancja R_L . Ale czy nie wydaje ci się podejrzane, że rezystancja emiterowa jest tak duża, a rezystancja obciążenia tak mała? Jeśli cię to trochę niepokoi, masz rację!

Żeby pokazać ci problem i nie mącić obrazu obecnością kondensatora wyjściowego, przeanalizujemy wtórnik z **rysunku 16a**. Załóżmy, że zmienne napięcie wyjściowe w układzie z **rysunku 16** powinno wynosić $12V_{pp}$, a konkretnie w dodatnich szczytach $+6V$, w ujemnych "dolinach" $-6V$. Przy oporności R_L równej $1k\Omega$, w tych szczytach przez obciążenie powinien płynąć prąd o chwilowej wartości równej $6mA$.

Przy sygnałach dodatnich względem masy tranzystor się otwiera i to on dostarcza potrzebnego prądu. Nie ma tu ograniczeń – tranzystor dostarczy tyle prądu, ile trzeba, by napięcie na emiterze nadążało za napięciem bazy. Jasne?

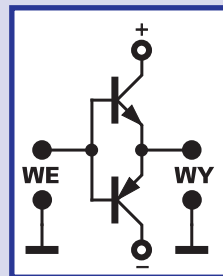
Gorzej jest, gdy napięcie wejściowe spada poniżej napięcia masy. Wtedy tranzystor się przytyka a może nawet całkowicie zatyka, a "ujemny" prąd obciążenia płynie przez rezystor R_E . I tu zaczyna się problem. Przy podanych napięciach nawet gdy tranzystor zupełnie nie przewodzi, maksymalny "ujemny" prąd obciążenia jest ograniczony wartościami R_E i napięcia zasilającego do około $99\mu A$. Większy być nie może ($I_{max} = -U_{zas} / (R_E + R_L)$), wobec tego największe ujemne napięcie na obciążeniu R_L wyniesie tylko:

$$99\mu A * 1k\Omega = 99mV$$

Wynika z tego, że wtórnik z **rysunku 16a** może prawidłowo pracować, ale tylko z sygnałami o amplitudzie nie większej niż $99mV$ ($198mV_{pp}$). Przy większych amplitudach przebieg wyjściowy (jego ujemna część) będzie koszmarnie zniekształcony, jak po-

kuje to **rysunek 16b**.

Jak temu zaradzić? Oczywiście wystarczy zmniejszyć R_E . Ścisłej biorąc, wszystko zależy od dwóch czynników: wymaganej wartości zmiennego napięcia wyjściowego oraz maksymalnego prądu "ujemnego", wyznaczonego przez szeregową połączenie R_E i R_L . Moglibyśmy tu



Rys. 17 a

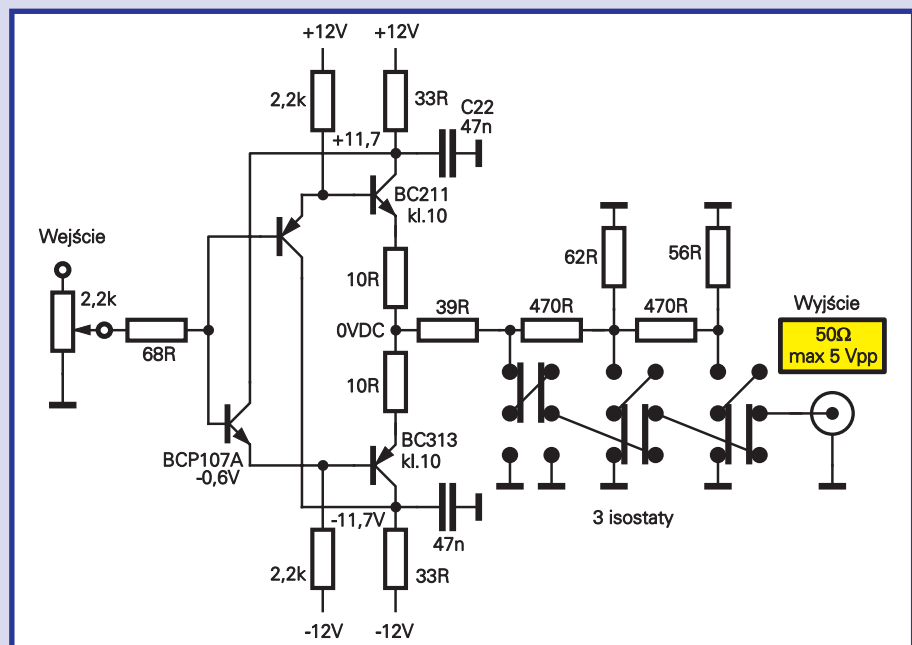
wyprowadzić odpowiednie wzory, ale nie są one konieczne. Powróć do **rysunku 15** i zrozum istotę problemu – aby nie było zniekształceń, wymagana maksymalna (szczytowa) wartość zmiennego prądu płynącego przez obciążenie musi być mniejsza od połowy (stałego) spoczynkowego prądu, płynącego przez R_E . Sam zastanów się, dlaczego "od połowy" – przy okazji zrozumiesz, dlaczego w podręcznikach jest napisane, że oporność wyjścio-

wa wtórnika dla dużych sygnałów jest równa rezystancji R_E .

Ścisłej biorąc, przedstawiony wtórnik ma małą oporność wyjściową dla przebiegów dodatnich, a dużą (równą R_E) tylko dla dużych sygnałów ujemnych.

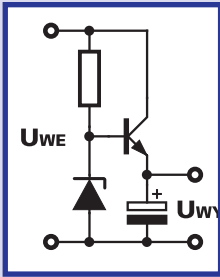
Jakie to ma konsekwencje praktyczne? Przy niewielkich opornościach obciążenia R_L musisz stosować odpowiednio małe wartości R_E , czyli zwiększać prąd spoczynkowy. Często jest to niepożądane, bo chcemy utrzymać mały pobór prądu, nie rezygnując z małej rezystancji wyjściowej także przy dużych sygnałach. Czy jest na to rada?

Dobrym, często stosowanym w praktyce rozwiązaniem jest wykorzystanie wtórnika komplementarnego. Oczywiście nie takiego z **rysunku 17a**, bo ten wprowadzałby ogromne zniekształcenia "w strefie przejściowej". Praktyczny przykład wypróbowanego wtórnika komplementarnego znajdziesz na **rysunku 17b**. Taki układ stosowany był w generatorze o częstotliwości do $1MHz$, zapewniał stałą rezystancję wyjściową równą 50Ω . Zamiast tranzystorów BC211 i BC313 można użyć jakichkolwiek innych o mocy strat $1W$ i wzmacnieniu powyżej 100 . Mogą to być popularne tranzystory rodziny BD135...140, lub podobne średniej mocy, ale należy się upewnić, czy mają wzmacnienie prądowe większe niż $60...70$. Jeśli nie jest potrzebna tak mała rezystancja wyjściowa (50Ω) i układ będzie obciążany większą rezystancją, nie trzeba montować wyjściowego dzielnika i zamiast tranzystorów BC211 i BC313 grupy 10 zastosować jakiegokolwiek tranzystory komplementarne małej mocy, np. BC548B, BC558B.



Rys. 17 b

Pierwsze kroki



Rys. 18

Jeśli weźmiesz schemat wzmacniacza mocy audio na tranzystorach bipolarnych, to najprawdopodobniej tranzystory wyjściowe również pracują tam w układzie OC.

Jak widzisz, wzmacniacz OC jest wykorzystywany nie tylko w obwodach małych sygnałów stałych i zmiennych.

I jeszcze sprawa częstotliwości granicznych.

W układach z kondensatorem na wejściu (np. rysunki 1, 4, 15) pasmo przeniesienia jest ograniczone od dołu przez pojemność tego kondensatora wejściowego. Pojemność ta tworzy z całkowitą rezystancją wejściową filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej

$$f_{(-3dB)} = 1 / 2\pi RC$$

Na koniec rozważań o wzmacniaczu OC podam ci jeszcze kilka wyjaśnień. **Rysunek 18** pokazuje przykład wykorzystania go w prostym stabilizatorze

torze

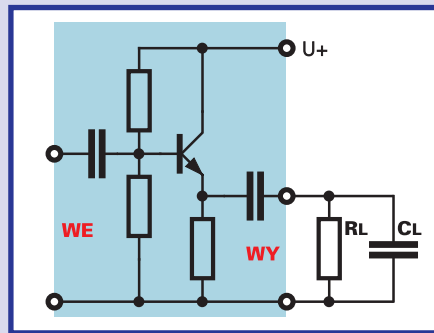
W praktyce pojemność wejściowa nie może być mniejsza niż:

$$C = 160 / f R$$

gdzie R - całkowita rezystancja wejściowa (tranzystora i rezystorów polaryzujących) w kiloomach, f - częstotliwość graniczna w hercach, pojemność C wychodzi w mikrofaradach.

W praktyce pojemność C powinna być przynajmniej 3-krotnie większa, bo wzór dotyczy spadku poziomu o 3dB.

To samo dotyczy pojemności wyjściowej, oddzielającej R_E od R_L . Wymaganą pojemność oblicza się z ostatniego wzoru, podstawiając wartość R_L . Te dwie pojemności ograniczają pasmo od dołu. Ale często wtórnik przenoszą też przebiegi stałe, jak układ z rysunku 17b.



Rys. 19

Jeśli chodzi o górę pasma, to teoretycznie wtórnik mógłby pracować aż do częstotliwości granicznej tranzystora (tranzystorów), wynoszącej ponad sto megaherców. W praktyce przy większych amplitudach pasmo ogranicza od góry pojemność obciążenia, dołączona równoległe do R_L , na **rysunku 19** oznaczona C_L . Składają się na nią pojemności montażowe i pojemność samego obciążenia. Konieczność przeładowania pojemności prądem płynącym przez R_E powoduje takie same ograniczenia, jak przy małej wartości R_L (porównaj rysunki 15 i 16). Zresztą pojemność C_L można traktować jako dodatkową oporność (reaktancję) malejącą ze wzrostem częstotliwości. Inaczej mówiąc, przy bardzo dużych częstotliwościach oporność (impedancja) obciążenia maleje ze względu na obecność pasożytniczych pojemności obciążających wyjście.

I tyle informacji mam dla ciebie na temat układu OC.

W następnym odcinku przyjrzymy się wzmacniaczowi tranzystorowemu w układzie wspólnego emitera.

Piotr Górecki