

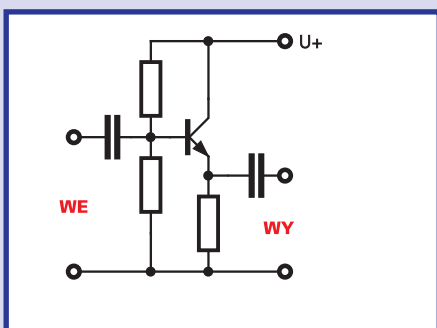


W poprzednich odcinkach przedstawiłem model tranzystora. Od pewnego czasu krążymy wokół tematu, którego nie sposób ominąć. Musisz dobrze zapoznać się z właściwościami tranzystora pracującego w układach wspólnego kolektora, wspólnego emitera i wspólnej bazy. Teraz masz wszelkie informacje, które sprawią, że takie zapoznanie wcale nie będzie bolesne, a może nawet być przyjemne. Dla rozgrzewki pod lupę weźmiemy najpierw "prosty" układ ze wspólnym kolektorem.

Od razu przygotuj sobie EdW 11/98, bo będziesz korzystał z zamieszczonych tam rysunków.

Wspólny kolektor – OC

Literki OC w śródtytule to międzynarodowy skrót oznaczający właśnie wspólny kolektor; w krajowej literaturze spotkasz często skrót WK. Przykład realizacji układu ze wspólnym kolektorem znajdziesz na **rysunku 1**. W przykładach, które omawiałem wcześniej sygnał wyjściowy zawsze występował na kolektorze. Teraz kolektor podłączony jest wprost do szyny zasilania, a wyjściem jest emiter. Nic nie szkodzi - podstawowa zasada działania układu OC jest beznadziejnie prosta: jak pamiętasz, złącze baza-emiter możesz traktować jak najzwyklejszą diodę. W czasie normalnej pracy na tej "diodzie" wy-



Rys. 1

stępuje spadek napięcia wynoszący około 0,6V. I to jest kluczowa informacja o układzie OC.

Przeanalizujmy wspólnie układ z **rysunku 2a**. Zaznaczyłem ci na nim wszystkie ważne napięcia i prądy stałe. Przyjmijmy dla ułatwienia, że wzmocnienie prądowe tranzystora, czyli β wynosi 100, a napięcie U_{BE} jest równe 0,6V.

Od czego zacząć? Obowiązkowo od obwodu bazy, a dokładnie - napięcia bazy. Napięcie na bazie jest praktycznie równe napięciu baterii B1. W rzeczywistości jest mniejsze o niewielki spadek napięcia na rezystorze R_B . Na razie pomірmy ten szczegół - niech napięcie bazy wynosi +6V. Tranzystor jest otwarty, płynie prąd w obwodzie kolektor-emiter. Jaki prąd? Wartość tego prądu wyznaczona jest przez rezystancję R_E (270 omów) i napięcie na tej rezystancji (5,4V). Napięcie to, U_E , jest równe napięciu bazy pomniejszonemu o napięcie baza-emiter U_{BE} .

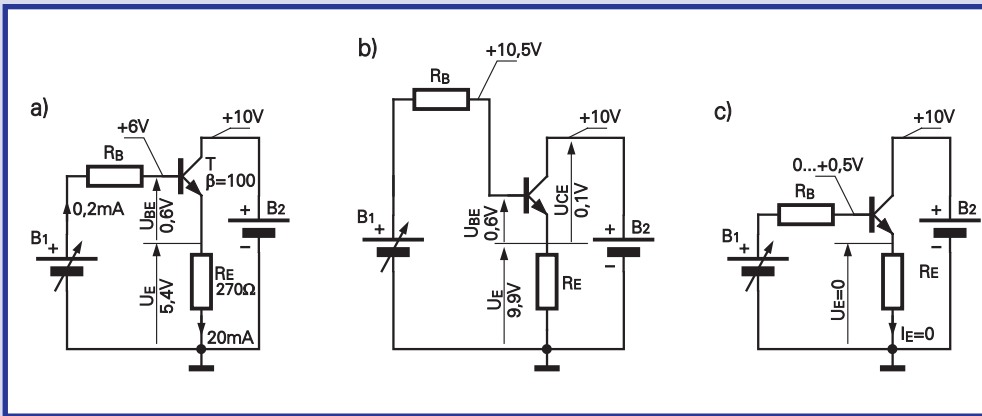
A co się stanie, jeśli napięcie na bazie się zwiększy? Napięcie na emiterze też się zwiększy. Nie masz chyba wątpliwości, że napięcie wyjściowe (na emiterze) podąża za zmianami napięcia bazy, będąc cały czas niższe o około 0,6V.

Rozpatrzmy pewne przypadki szczególne dla prądów stałych. Gdy napięcie na bazie będzie równe napięciu kolektora (dodatniemu napięciu zasilania), wtedy napięcie na emiterze będzie o te około 0,6V niższe. A co wtedy, gdy napięcie bazy jeszcze trochę wzrośnie, powiedzmy pół wolta powyżej napięcia zasilania? Niemożliwe? Wprost przeciwnie, taka sytuacja czasami się zdarza. Co wtedy? Popatrz na **rysunek 2b**. Nie zapominaj, że napięcie nasycenia tranzystora (U_{CEsat}) przy niewielkich prądach wynosi kilkanaście czy kilkadziesiąt miliwoltów – tym samym podwyższając napięcie bazy powyżej napięcia kolektora możesz uzyskać na emiterze napięcie wyjściowe różniące się od napięcia kolektora tylko o te miliwołty. Dokładnie przeanalizuj rysunek 2b i zapamiętaj wnioski.

A gdyby napięcie baterii B1 było znacznie wyższe niż napięcie kolektora?

Wtedy prąd będzie płynął z baterii B1 przez rezystor R_B . Jeśli wartość R_B będzie niewielka, to bateria B1 będzie nie tylko zasilać nasz wzmacniacz tranzystorowy, ale nawet ładować baterię B2. Nie jest to groźne dla tranzystora, dopóki nie jest przekroczony maksymalny katalogowy prąd bazy I_{Bmax} .

Pierwsze kroki



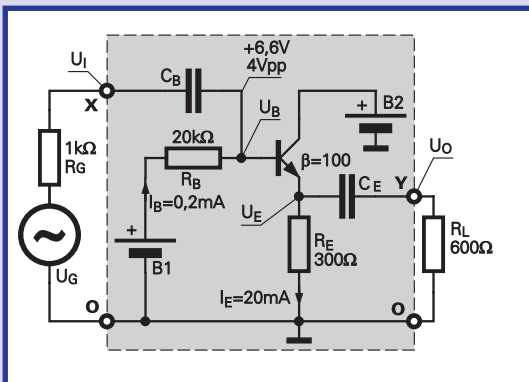
Rys. 2

A co będzie, gdy napięcie bazy będzie wynosić 0...0,5V? Sytuację ilustruje rysunek 2c. Dla napięć z tego zakresu tranzystor będzie praktycznie zatkany i napięcie wyjściowe będzie równe zeru. A dlaczego tylko od zera do 0,5V, a nie 0,6V? Porównaj rysunek 6 w EdW 11/98 str. 66 i przekonaj się, że znaczący prąd bazy pojawi się dla napięć U_{BE} większych od 0,5V. Kwestia 0,5 czy 0,6V to mniej ważne szczegóły - nie musisz się w nie wgłębiać.

Ogólnie wszystko jest jasne i proste. Wzmacniacz OC wprowadzi nie wzmacnia napięcia, ale wzmacnia prąd. Zwróć uwagę, że napięcie na obciążeniu podąża za napięciem wejściowym (będąc od niego o 0,6V mniejsze), a co najważniejsze – prąd bazy, obciążający źródło sygnału jest β -krotnie mniejszy od prądu obciążenia (ściślej $\beta+1$ -krotnie, ale to nie ma w praktyce absolutnie żadnego znaczenia). Ponieważ w układzie wspólnego kolektora napięcie na wyjściu powtarza zmiany napięcia wejściowego (wtóruje mu), jest on bardzo często nazywany **wtórnikiem**. Żeby było śmieszniej – **wtórnikiem emiterowym**.

Zapamiętaj: wtórnik emiterowy to wzmacniacz tranzystorowy w układzie OC.

Stałoprądowy wzmacniacz OC jest bardzo często wykorzystywany w roli bufora – w wielu wypadkach obciążenia nie można podłączyć wprost do jakiegoś punktu w układzie, a zastosowanie bufora w postaci jednego tranzystora rozwią-



Rys. 4a

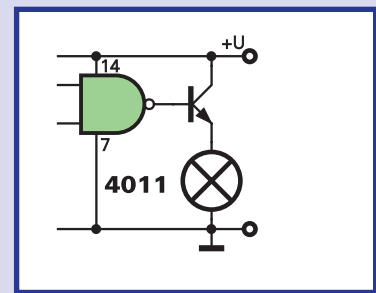
zuje problem. Przykład takiego zastosowania pokazany jest na rysunku 3. Zwróć uwagę, że nie ma tu potrzeby stosowania rezystora R_B .

Idziemy dalej.

Rysunki 2 i 3 dotyczą napięć i prądów stałych. A jakie będą właściwości układu OC dla przebiegów zmiennych?

W analizie układu z rysunku 1 pomoże **rysunek 4**. Nie jest to jakiś inny wtórnik – nadal tranzystor spolaryzowany jest napięciem stałym i płyną stałe prądy bazy oraz emitera. I na te stałe prądy i napięcia nałożone są przebiegi zmiennne. Stałe napięcie polaryzujące na bazie tranzystora z rysunku 4a wynosi 6,6V i na to napięcie nałożony jest przebieg sinusoidalny o wartości międzyszczytowej równej 4V. Przebiegi na bazie, emiterze i na wyjściu pokazane są na rysunku 4b. Porównanie przebiegów U_i , U_o (które są praktycznie jednakowe) rodzi pytanie, po co taki wzmacniacz, który nie wzmacnia?

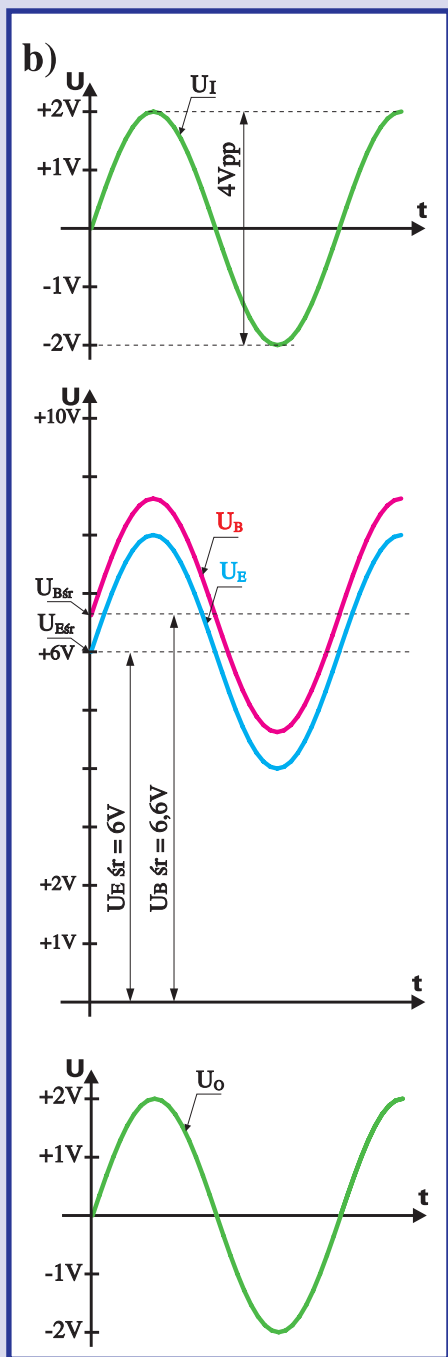
Wbrew pozorom, taki wzmacniacz jest bardzo potrzebny i często stosowany. Zapewne się już domyślasz, że chodzi o wzmacnienie prądu. Musisz to dobrze zrozumieć, dlatego pomęcę cię trochę i przeanalizujemy sprawę oporności wejściowej i wyjściowej. Popatrz na **rysunek 5**. Niech nasze źródło sygnału – generator – o jakimś napięciu U_G ma oporność wewnętrzną R_G , powiedzmy 1kΩ. Gdybyśmy bezpośrednio dołączyli do niego oporność obciążenia R_L równą 600Ω, napięcie w punkcie X spadłoby o ponad 60% (do 37,5% U_G). Gdy jednak podłączymy obciążenie równe na przykład 10kΩ, napięcie to spadnie tylko o niecałe 10% (do ok. 91% U_G). Popatrz uważnie na rysunek 4. Chcielibyśmy, żeby oporność wejściowa naszego wtórnika (dla prądów zmiennych) była jak największa. Zapewne już gdzieś czytałeś, że to właśnie układ ze wspólnym kolektorem stosowany jest w przypadkach, gdy do źródła sygnału mającego znaczny opór wewnętrzny trzeba podłączyć obciążenie o małej oporności. Przekonałeś się, że w obwodach



Rys. 3

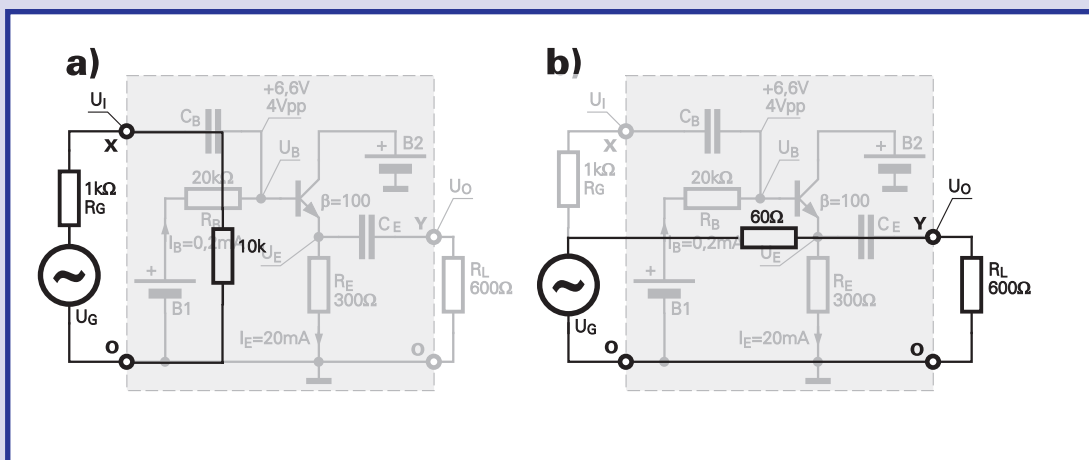
prądu stałego to rzeczywiście działa. Zbadajmy teraz, jaka jest oporność wejściowa i wyjściowa wtórnika emiterowego dla przebiegów zmiennych.

Oporność wejściowa to stosunek (zmiennego) napięcia wejściowego do



Rys. 4b

(zmiennego) prądu wejściowego. W układzie z rysunków 4 i 5 mamy napięcie wejściowe (w punkcie X) o wartości 4Vpp, musimy obliczyć jakie są zmiany prądu wejściowego. Na razie przeanalizujemy jak zachowuje się sam tranzystor, bez wejściowych obwodów polaryzacji i bez obciążenia rezystancją R_L . Załóżmy, że tranzystor ma wzmocnienie prądowe (β) równe 100. W warunkach pokazanych na



Rys. 6

rysunku 4 przy średnim napięciu stałym emitera równym +6V przez rezystor R_E (300Ω) płynie średni prąd 20mA, więc średni prąd bazy wynosi 0,2mA. Chwilowe napięcie i prąd emitera zmieniają się w takt sygnału: w "dolinach" spadają do wartości 4V, 13,3(3)mA, a w szczytach wzrastają do 8V, 22,6(6)mA.

Odpowiednio zmienia się też prąd bazy – oscyluje on między wartościami 0,13(3)...0,26(6)mA mając średnią wartość równą 0,2mA. Czyli przy zmianach napięcia wejściowego o 4V, prąd bazy zmienia się tylko o

$$\Delta I = 0,26(6) - 0,13(3) = 0,13(3)\text{mA}$$

A więc rezystancja wejściowa naszego tranzystora z rysunku 4 wynosi:

$$R_{we} = 4V / 0,13(3)\text{mA} = 30k\Omega$$

Aż 30kΩ, czyli 100-krotnie więcej niż wynosi rezystancja R_E . Czy te 100-krotnie to przypadek? Nie!

Sprawdź dla jakiegokolwiek wartości wzmocnienia (β), że także dla przebiegów zmiennych oporność wejściowa wtórnika będzie β -krotnie większa niż oporność emiterowa.

Ale to nie koniec. Czy rzeczywiście tranzystorowy wzmacniacz z rysunku 4 ma dla przebiegów zmiennych rezystancję wejściową równą 30kΩ?

Nie i to z dwóch powodów.

Po pierwsze pominęliśmy oporność obciążenia R_L . Dołączenie obciążenia spowoduje, że dla prądów zmiennych wypadkowa oporność rezystancji między emiterem a masą będzie równa równoległemu połączeniu R_E i R_L (zakładamy, że C_E ma bardzo dużą pojemność). Przy war-

tościach podanych na rysunku 4 obciążenie dla przebiegów zmiennych będzie równe 200Ω. Już z tego powodu oporność wejściowa dla prądów zmiennych, widziana od strony bazy wyniesie nie 30kΩ tylko 200Ωx100=20kΩ.

Ale to nie koniec. Dotychczasowe rozważania nadal nie uwzględniają rezystancji R_B . Tymczasem rezystancja ta też jest obciążeniem dla generatora G. Bateria B1 ma oporność wewnętrzną równą lub bliską zero, a więc dla prądów zmiennych stanowi zwarcie, podobnie jak kondensator o dużej pojemności (zapamiętaj to raz na zawsze). Jeśli tak, to ostatecznie generator G jest obciążony równoległym połączeniem rezystancji R_B (20kΩ) i obliczonej rezystancji wejściowej tranzystora (20kΩ), czyli rezystancją równą 10kΩ.

Ilustruje to **rysunek 6a**. Obciążenie R_L podłączyliśmy do źródła (generatora) przez wtórnik. Skoncentruj się! Źródło "widzi" nasze obciążenie nie jako rezystancję 600Ω, tylko jak wyliczyliśmy – 10kΩ. Czy to zrozumiałeś? Wtórnik zwiększył oporność obciążenia widzianą od strony źródła (teoretycznie β -krotnie, w praktyce mniej). Zapamiętaj takie sformułowanie – spotkasz je w literaturze. Spotkasz też inne stwierdzenie: "wtórnik zmniejsza oporność (impedancję) wyjściową układu". To nie jest uzupełnienie poprzedniego wniosku, tylko wyrażenie go w inny sposób, z innego punktu widzenia. Gdy mianowicie rozpatrujemy sytuację widzianą od strony obciążenia, to stosowne jest to drugie stwierdzenie. Ilustruje to **rysunek 6b**. Zastosowanie wtórnika spowodowało, że obciążenie "widzi" iż generator ma oporność wyjściową znacznie mniejszą od R_G (teoretycznie β -krotnie, praktycznie mniej). W naszym przykładzie oporność wyjściowa (generatora z wtórnikiem) widziana od strony obciążenia wynosi 60Ω. Nic dziwnego, że wtórnik emiterowy jest też nazywany (aktywnym) transformatorem impedancji.

Dokładnie przemyśl tę sprawę i jeszcze raz przeanalizuj rysunki 4...6. Na rysunku 4 nie podałem ci, ile wynosi napię-

cie U_G , bo nie chciałem zamącić obrazu. Teraz możesz to łatwo obliczyć na podstawie rysunku 6a albo 6b. Wychodzi, że $U_G=4,4V_{pp}$.

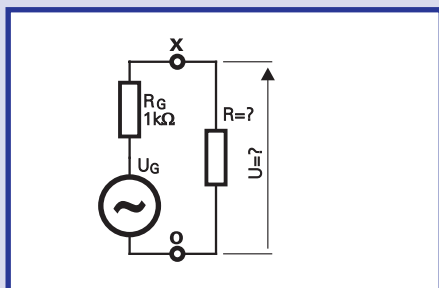
Mam nadzieję, iż wszystko jest jasne. Wyciągnijmy wnioski. W układzie stałoprądowym z rysunku 2 bufor transformuje oporności β -krotnie. W układzie zmiennoprądowym z rysunku 4 nie uzyskasz β -krotnej transformacji impedancji ze względu na obecność rezystora(-ów) polaryzacji bazy oraz wpływu R_E . Mimo to wzmocnienie prądowe (β) tranzystora powinno być jak największe, jak największe powinny być też rezystancje polaryzujące w obwodzie bazy.

Uzbrojony w podaną wiedzę możesz sam obliczyć, jaka będzie oporność wejściowa budowanych przez siebie wtórników. Ale wcześniej kilka ważnych drobiazgów.

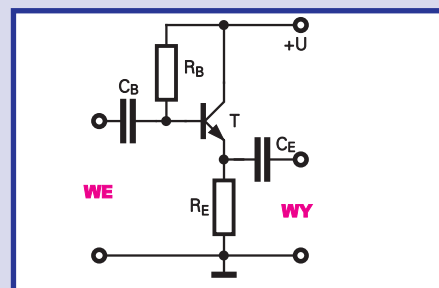
Oto pierwszy. Na **rysunku 7** znajdziesz schemat wtórnika emiterowego, spotykany w licznych książkach. Na pierwszy rzut oka wszystko jest dobrze – nawet bardzo dobrze, bo rezystancja polaryzująca w obwodzie bazy ma dużą wartość.

Uważaj teraz!

Gdy w jakiejś publikacji ktoś ci proponuje budowę urządzenia zawierającego taki wynalazek, możesz śmiało podejrzewać, że układ nie był rzetelnie sprawdzony i przetestowany, a jego twórca niewiele zna się na elektronice i prawdopodobnie nie zasługuje na miano konstruktora. Z ubolewaniem trzeba stwierdzić, że w amatorskiej literaturze do dziś pokutuje sporo układów z takimi "kwiatkami". Dlaczego jest to bardzo ryzykowne



Rys. 5



Rys. 7

Pierwsze kroki

rozwiązanie? Przekonaj się sam! Określ napięcie stałe na emiterze tranzystora z rysunku 7 przy podanych wartościach $R_B = 1M\Omega$ i $R_E = 5k\Omega$ dla trzech egzemplarzy tranzystorów o różnym wzmacnieniu:

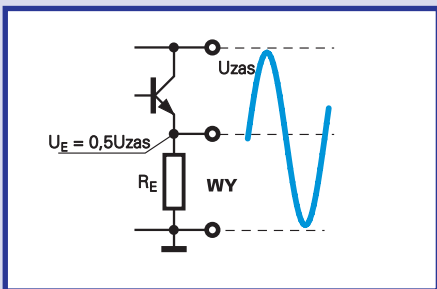
$\beta = 50$ (np. jakiś stary tranzystor BC527 czy BF519)

$\beta = 200$ (przeciętny współczesny tranzystor małej mocy)

$\beta = 1000$ (selekcjonowany tranzystor z grupy C)

Jak to liczyć? Nawet nie trzeba przeprowadzać szczegółowych obliczeń, tylko zrozumieć sedno sprawy. Biorąc rzecz w największym uproszczeniu powiemy, iż w układzie z tranzystorem o małym wzmacnieniu prąd bazy będzie stosunkowo duży, a przy dużym wzmacnieniu prąd bazy będzie mały. Ten prąd polaryzacji bazy płynie przez rezystor R_B i wywołuje na nim spadek napięcia: czym większy prąd, tym większy spadek napięcia. Już tu widać, że zastosowanie tranzystora o małym wzmacnieniu spowoduje, że napięcie stałe na rezystorze R_E będzie małe, nawet bardzo małe. Przy dużej wartości wzmacnienia napięcie na rezystorze R_E będzie duże, niewiele mniejsze od napięcia zasilającego. Najczęściej chcielibyśmy, by napięcie stałe na R_E było równe połowie napięcia zasilania – wtedy nasz wtórnik będzie mógł przenosić bez zniekształceń nawet duże sygnały. Ilustruje to **rysunek 8**.

Ponieważ jest to ważne, proponuję, byś samodzielnie wykonał dokładniejsze obliczenia napięć w układzie z rysunku 7.



Rys. 8

Napięcie zasilające rozłoży się na trzy części:

$$U_{zas} = U_{RB} + U_{BE} + U_{RE}$$

Przyjmijmy napięcie $U_{BE}=0,6V$.

$$U_{zas} = I_B \cdot R_B + 0,6V + \beta \cdot I_B \cdot R_E$$

przekształcamy kolejno, by obliczyć prąd bazy

$$U_{zas} = I_B(R_B + \beta \cdot R_E) + 0,6V$$

$$I_B(R_B + \beta \cdot R_E) = U_{zas} - 0,6V$$

$$I_B = (U_{zas} - 0,6V) / (R_B + \beta \cdot R_E)$$

Potem znając I_B obliczamy

$$U_E = \beta \cdot I_B \cdot R_E$$

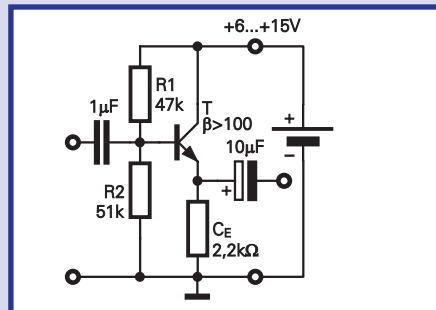
Wykonaj obliczenia dla trzech podanych wartości β .

I co? Przekonałeś się ostatecznie, że w układzie z rysunku 7 napięcie stałe na emiterze zależy ogromnie od wzmacnienia tranzystora. To jest poważna wada.

Co prawda, jeśli konstruujesz jeden układ dla własnych potrzeb, to od biedy mógłbyś sobie pozwolić na układ z rysunku 7. Dobralbyś eksperymentalnie wartość R_B , by uzyskać napięcie na R_E równe mniej więcej połowie napięcia zasilania. Ale co wtedy, gdy po pewnym czasie tranzystor ulegnie uszkodzeniu? Czy ktoś reperujący two urządzenie będzie pamiętał o konieczności dobrania rezystora R_B , czy wlotuje pierwszy lepszy tranzystor tego samego lub podobnego typu?

Dobry konstruktor nie może sobie pozwolić na takie nedoróbki. Musi przewidzieć, że w układzie mogą być zastosowane tranzystory o różnym wzmacnieniu, i albo podać warunek, że wzmacnienie tranzystora ma być większe, np. od 300 (np. stosując tranzystory z grup B lub C), albo zaproponuje rozwiązanie uniwersalne tolerujące tak duży rozrzut parametrów.

A jakie to miałyby być rozwiązanie uniwersalne? W praktyce wystarczy zasto-



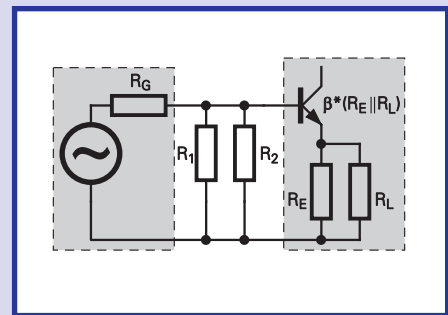
Rys. 9

sować dzielnik napięcia R_1, R_2 według **rysunku 9**. I tu powinieneś raz na zawsze przyswoić sobie ważną zasadę: jeśli chcesz się uniezależnić od wzmacnienia tranzystora, prąd stały płynący przez rezystory dzielnika powinien być przynajmniej kilkakrotnie większy, niż spodziewany prąd obciążenia tego dzielnika, czyli stały prąd bazy.

Oblicz teraz, jak zmieni się napięcie na emiterze tranzystora w układzie z rysunku 9, gdzie prąd dzielnika jest kilkakrotnie większy od spodziewanego największego prądu bazy. Obliczenia przeprowadź jak poprzednio dla wartości β : 50, 200 i 1000.

I co? Teraz lepiej?

Ale nie należy też przesadzać ze zwiększaniem prądu dzielnika w obwodzie bazy. Nic za darmo! Większy prąd to mniejsze rezystancje dzielnika i mniejsza wypadkowa rezystancja wejściowa całego wtórnika. Przykładowo dla układu z rysunku 9 oporność wejściowa dla przebiegów zmiennych wynosi około 20 kilolomów i nie-



Rys. 10

wiele zależy od wzmacnienia tranzystora, bo jest określona głównie przez rezystancje dzielnika R_1 i R_2 . Ponieważ dla przebiegów zmiennych bateria zasilająca stanowi zwarcie (w praktyce zwarcie takie zapewniają kondensatory filtrujące napięcie zasilania), więc dla przebiegów zmiennych rezystory dzielnika z rysunku 9 są połączone równolegle, a do tego dochodzi rezystancja wejściowa tranzystora (iloczyn wzmacnienia β i wypadkowej oporności R_E i R_L). Ilustruje to **rysunek 10**. Zmiany wzmacnienia tranzystora niewiele tu zmienia.

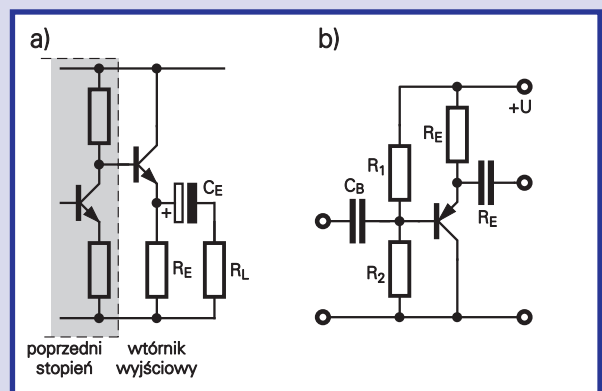
Jaki stąd wniosek? Bardzo prosty – w swoich układach powinieneś stosować tranzystory o jak największym wzmacnieniu – wtedy stały prąd bazy będzie mały i wtedy będziesz mógł zastosować duże wartości rezystorów dzielnika w obwodzie bazy.

W praktyce często udaje się ominąć ten problem i dołączyć bazę wprost do poprzedniego stopnia, o ile napięcie stałe jest tam właściwe. Przykład pokazany jest na **rysunku 11**.

Przy okazji drobne przypomnienie: w dotychczasowych rozważaniach pokazywałem ci układy z tranzystorem NPN. Nic nie stoi na przeszkodzie, być budował wtórnik z tranzystorami PNP. Schemat będzie ten sam, trzeba tylko odwrotnie podłączyć bieguny zasilania i ewentualnie odwrotnie włączyć kondensatory elektrolityczne. Przykład masz na rysunku 11b.

Za miesiąc podam kolejne ważne informacje o wzmacniaczu ze wspólnym kolektorem

Piotr Górecki



Rys. 11