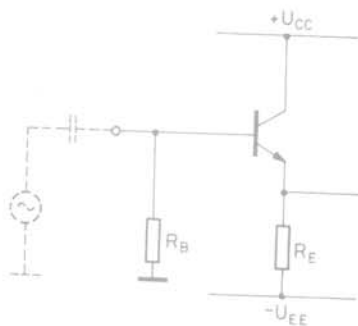


**Rysunek 2.17.**  
Wtórnik emiterowy ze sprzężeniem bezpośrednim i dwupolarnymi (np. symetrycznymi) napięciami zasilającymi



**Rysunek 2.18.**

nym. Upraszcza to ustalanie punktu pracy i eliminuje kondensator sprzęgający (rys. 2.17). Uwaga: zawsze musi istnieć możliwość przepływu stałego prądu bazy, odpowiadającego ustalonemu punktowi pracy, nawet gdy prąd ten płynie tylko do masy układu. Dla układu z rys. 2.17 założono, że źródło sygnału umożliwia przepływ prądu stałego do masy. Jeśli tak nie jest (np. gdy źródło sygnału dołączono przez kondensator), trzeba umieścić rezystor między bazą a masą układu (rys. 2.18). Rezystor  $R_B$  powinien mieć wartość rezystancji równą około jednej dziesiątej  $h_{FE}R_E$ , podobnie jak w poprzednim układzie.

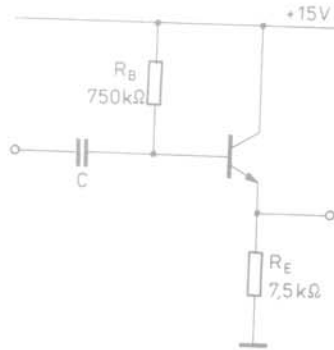
#### ĆWICZENIE 2.5

Zaprojektuj wtórnik emiterowy przewidywany do pracy w pasmie akustycznym ( $20 \text{ Hz} \div 20 \text{ kHz}$ ) i zasilany napięciami  $+15 \text{ V}$  i  $-15 \text{ V}$ . Przyjmij wartość prądu spoczynkowego emitera równą  $5 \text{ mA}$ . Załóż, że źródło sygnału będzie dołączone do wtórnika przez kondensator.

#### Przykład niewłaściwego ustalania punktu pracy wtórnika

Niestety, czasami spotyka się układy równe fatalnie zaprojektowane jak ten, przedstawiony

na rys. 2.19. Wartość  $R_B$  wybrano przy założeniu określonej wartości  $h_{FE}$  ( $100 \text{ A/A}$ ), która posłużyła do obliczenia wartości prądu bazy, oraz  $7 \text{ V}$  spadku napięcia na  $R_B$ . Jest to przykład złego projektowania, gdyż  $h_{FE}$  nie jest dobrym parametrem — może zmieniać znacząco swoją wartość. Gdy ustalimy punkt pracy za pomocą



**Rysunek 2.19.**  
Nie stosuj takiego układu!

„sztywnego” dzielnika napięciowego, jak to zrobiono w wcześniejszym, szczegółowo przedstawionym przykładzie, spoczynkowy punkt pracy jest niewrażliwy na zmiany  $\beta$  tranzystora. Na przykład, gdy w poprzednio zaprojektowanym układzie zastosujemy tranzystor o  $h_{FE} = 200 \text{ A/A}$  zamiast tranzystora o nominalnej wartości  $h_{FE} = 100 \text{ A/A}$ , potencjał emitera wzrośnie tylko o  $0,35 \text{ V}$  (5%). Równie łatwo, jak w przypadku wtórnika emiterowego, można wpaść w taką pułapkę i zaprojektować zły układ, używając tranzystora w innej konfiguracji (np. wzmacniacza ze wspólnym emiterem, który będziemy omawiać w dalszej części niniejszego rozdziału).

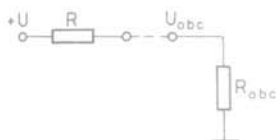
#### 2.06. Tranzystorowe źródło prądowe

Źródła prądowe, chociaż często lekceważone, są równie ważne i użyteczne jak źródła napięciowe. Często znakomicie przydają się przy ustalaniu punktu pracy tranzystora i są niezerowane jako „obciążenia aktywne” dla stopni wzmacniających o dużym wzmocnieniu oraz jako źródła emiterowe we wzmacniaczach różnicowych. Źródła prądowe są potrzebne w układach integratorów, generatorów przebiegów liniowych i piłozębnych. Stosowane są również do realizacji układów przesuwania napięcia o dużym dopuszczalnym zakresie zmian napięcia we-

wnętrz układów wzmacniaczy i stabilizatorów. Wreszcie, źródła prądowe znajdują zastosowanie w świecie zewnętrznym jako źródła prądu stałego, np. w elektrochemii lub elektroforezie.

#### Rezystor i źródło napięciowe

Na rysunku 2.20 przedstawiono najprostszy układ, który w przybliżeniu może pełnić funkcję



Rysunek 2.20.

źródła prądowego. Dopóki  $R_{obc} \ll R$  (lub, inaczej mówiąc,  $U_{obc} \ll U$ ), dopóty prąd płynący w układzie jest prawie stały i w przybliżeniu równy:

$$I = U/R$$

Obciążenie nie musi być rezystorem. Kondensator włączony zamiast  $R_{obc}$  będzie ładował się ze stałą prędkością tak długo, jak długo prawdziwa będzie nierówność  $U_{kondens} \ll U$ . Jest to po prostu początkowy fragment wykładniczego ładowania się kondensatora z układu RC.

Proste, rezystorowe źródło prądowe ma pewne wady. Aby układ ten dobrze aproksymował prawdziwe źródło prądowe, należy użyć napięć o dużych wartościach, co powoduje ogromne straty mocy w rezystorze. W dodatku, wartość natężenia prądu takiego źródła nie jest łatwo programowalna, tzn. nie daje się sterować w dużym zakresie zmian napięciem występującym gdzie indziej w układzie.

#### ĆWICZENIE 2.6

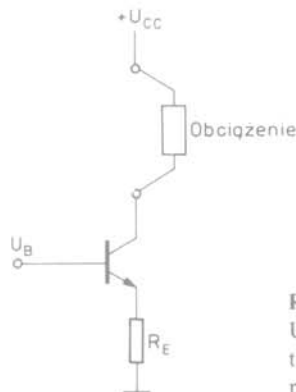
Jak duża musi być wartość siły elektromotorycznej źródła napięciowego tworzącego z szeregowo połączonym rezystorem źródło prądowe, aby zmiany wydajności źródła prądowego nie przekraczały 1%, przy zmianach napięcia na obciążeniu od 0 do 10 V?

#### ĆWICZENIE 2.7

Przypuśćmy, że wydajność źródła prądowego z poprzedniego zadania ma wynosić 10 mA. Jaka moc wydzieli się w rezystorze szeregowym? Ile mocy przedostanie się do obciążenia?

#### Tranzystorowe źródło prądowe

Na szczęście, można zrobić bardzo dobre źródło prądowe z tranzystora (rys. 2.21). Działa ono



Rysunek 2.21.  
Układ podstawowy tranzystorowego źródła prądowego

następująco: do bazy doprowadzamy napięcie  $U_B > 0,6$  V, co zapewnia stałe przewodzenie złącza baza-emiter i

$$U_E = U_B - 0,6 \text{ [V]}$$

Stąd

$$I_E = U_E/R_E = (U_B - 0,6)/R_E$$

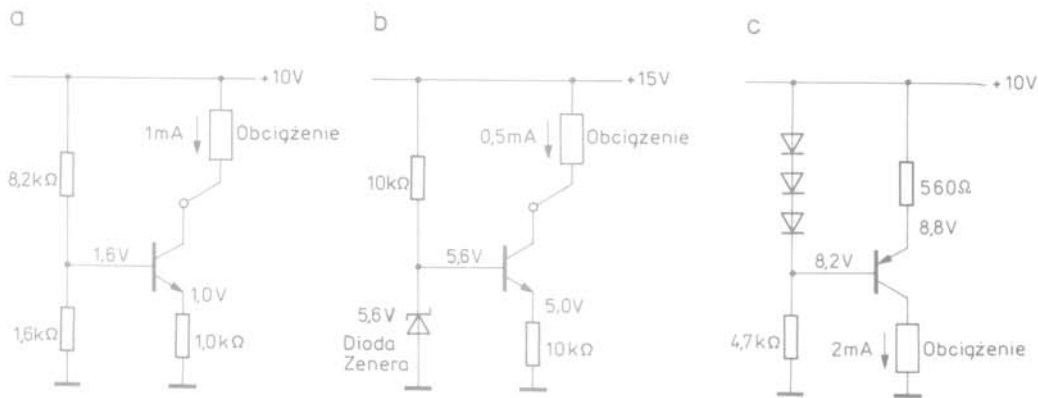
Ponieważ dla  $h_{FE}$  o dużej wartości  $I_E \approx I_C$ , więc

$$I_C \approx (U_B - 0,6)/R_E$$

niezależnie od wartości  $U_C$  dopóty, dopóki tranzystor nie jest nasycony ( $U_C > U_E + 0,2$  [V]).

#### Ustalanie punktu pracy źródła prądowego

Potencjał bazy może być ustalany na wiele różnych sposobów. Nadaje się do tego celu dzielnik napięcia, jeśli jest dostatecznie „sztywny”. Jak poprzednio, kryterium przydatności dzielnika jest wartość jego rezystancji zastępczej, która powinna być znacznie mniejsza od wartości rezystancji stałoprądowej widzianej z zacisku bazy w stronę tranzystora ( $h_{FE}R_E$ ). Można również zastosować diodę Zenera, zasilaną z napięcia  $U_{CC}$ , lub kilka szeregowo połączonych diod spolaryzowanych w kierunku przewodzenia i włączonych między bazę a emiterowe źródło zasilające. Kilka przykładowych rozwiązań pokazano na rys. 2.22. W ostatnim przykładzie (rys. 2.22c) z tranzystora typu *p-n-p* prąd wypływa do obciążenia dołączonego jedną końcówką do masy. Układy z pozostałych przykładów (w których użyto tranzystorów typu *n-p-n*) powinny być właściwie nazwane pochłaniaczami prądu, lecz w praktyce przyjęło się wszystkie te układy nazywać źródłami prądowymi. Dzielnik napięcia, występujący w pierwszym układzie, o wartości rezystancji zastępczej równej około 1,3 kΩ jest bardzo „sztyw-



Rysunek 2.22.

Układy źródeł prądowych, ilustrujące trzy metody ustalania punktu pracy tranzystora realizującego źródło. Tranzystory *n-p-n* realizują źródła pochłaniające prąd, natomiast tranzystory *p-n-p* — źródła emitujące prąd do obciążenia. Układ z rysunku (c) ilustruje możliwość dołączenia jednej końcówki obciążenia do masy układu

ny<sup>2)</sup>, gdy porównamy go z wartością rezystancji równą około 100 kΩ, widzianą z bazy w stronę tranzystora (dla  $h_{FE} = 100$  A/A). Stąd jakiegokolwiek zmiany bety, powodowane zmianą potencjału kolektora, nie będą znacząco oddziaływać (poprzez zmianę potencjału bazy) na wydajność źródła. Dla pozostałych dwóch układów, wartości rezystancji rezystorów ustalających punkty pracy diod wybiera się tak, aby przez diody płynęły prądy rzędu kilku miliamperów.

#### Podatność

Źródło prądowe może dostarczać do obciążenia prąd o stałym natężeniu jedynie w pewnym ograniczonym zakresie wartości napięcia na obciążeniu. Przy założeniu, że może być inaczej, prowadziłoby do wniosku, że do obciążenia można dostarczyć nieskończoną moc. Zakres wartości napięcia wyjściowego, dla którego źródło prądowe zachowuje się właściwie, nazywa się jego *podatnością* wyjściową. Dla poprzednio omawianych tranzystorowych źródeł prądowych zakresy dopuszczalnych wartości napięć są ustalone przez spełnienie wymagania, aby tranzystor pozostawał w aktywnym obszarze pracy. Tak więc, dla pierwszego układu potencjał kolektora może zmniejszać się do momentu, gdy tranzystor prawie osiągnie obszar nasycenia, a więc do około +1,2 V. W drugim układzie, o wyższym potencjale emitera, możemy odbierać prąd z obciążenia tylko wte-

dy, gdy wartość napięcia między kolektorem a masą jest większa niż około +5,2 V.

We wszystkich przypadkach potencjał kolektora może zmieniać się od wartości zbliżonej do tej, dla której występuje nasycenie tranzystora, aż do wartości napięcia zasilania. Na przykład, ostatni układ może dostarczać prąd do obciążenia dla napięcia na obciążeniu o dowolnej wartości, mieszczącej się w zakresie od 0 do około +8,6 V. W rzeczywistości, obciążenie może nawet zawierać baterie lub własne zasilacze, powodujące, że potencjał kolektora wykracza poza wartość napięcia zasilania. Jest to dopuszczalne, lecz należy uważać, aby nie nastąpiło przebicie tranzystora ( $U_{CE}$  nie może przekroczyć dopuszczalnej wartości napięcia między kolektorem a emiterem  $U_{CE0}$ ) oraz, aby nie wydzielala się nadmiernie duża moc (równa  $I_C U_{CE}$ ). Jak zobaczymy w podrozdziale 6.07, dla tranzystorów mocy występują dodatkowe ograniczenia obszaru bezpiecznej pracy.

#### ĆWICZENIE 2.8

W układzie są dostępne napięcia stabilizowane o wartościach +5 V i +15 V. Zaprojektuj źródło prądowe z tranzystorem *n-p-n* (pochłaniające prąd) o wydajności 5 mA, ustalając wartość potencjału bazy równą +5 V. W jakim zakresie może zmieniać się wartość napięcia wyjściowego tego źródła?

Potencjał bazy tranzystora realizującego źródło prądowe nie musi być stały. Zmieniając  $U_B$  otrzymujemy źródło prądowe programowane napięciem. Jeśli zmiany prądu źródła mają

<sup>2)</sup> Terminu „sztywny” użyto do opisu czegoś co nie uginą się po obciążeniu (przyp. tłum.).

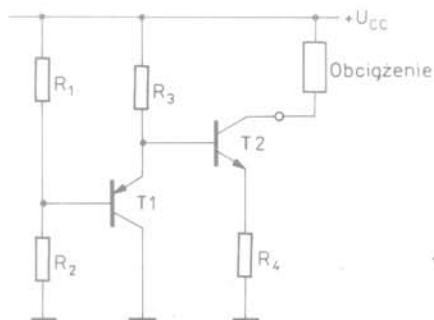
odzwierciedlać bez niespodzianek zmiany napięcia wejściowego, to amplituda zmian sygnału wejściowego  $u_{we}$  (pamiętaj, że symbole pisane małymi literami oznaczają *składowe zmienne*) musi pozostawać dostatecznie mała, aby potencjał emitera nigdy nie spadł do zera. W efekcie otrzymamy źródło prądowe o zmianach prądu wyjściowego proporcjonalnych do zmian napięcia wejściowego:  $i_{wy} = u_{we}/R_E$ .

#### □ Niedoskonałości źródeł prądowych

W jakim stopniu ten rodzaj źródła prądowego różni się od źródła idealnego? Mówiąc inaczej, czy prąd wyjściowy źródła zależy od napięcia wyjściowego, tzn., czy ma skończoną theveninowską rezystancję zastępczą ( $R_T < \infty$ ), a jeśli tak, to dlaczego? Występują dwa rodzaje zjawisk:

1. Dla danego prądu kolektora zarówno  $U_{BE}$  (efekt Early'ego) jak i  $h_{FE}$  nieznacznie zmieniają się wraz ze zmianami napięcia między kolektorem a emiterem. Zmiany  $U_{BE}$ , pojawiające się na skutek zmian napięcia na obciążeniu, powodują zmianę prądu wyjściowego źródła, gdyż ulega zmianie potencjał emitera (a tym samym zmienia się prąd emitera), nawet przy niezmiennym potencjale bazy. Przy stałym prądzie emitera zmiany wartości  $h_{FE}$  powodują małe zmiany prądu wyjściowego (kolektorowego) źródła, gdyż  $I_C = I_E - I_B$ . Ponadto, gdy zmienia się  $h_{FE}$  (a tym samym prąd bazy), występują zmiany potencjału bazy, powodowane przez efekt obciążenia źródła o niezerowej impedancji zastępczej, ustalającego potencjał bazy. Zmiany te są niewielkie. Na przykład, według danych z pomiarów, prąd wyjściowy układu z rys. 2.22a, w którym zastosowano tranzystor 2N3565, zmienia się nie więcej niż o 0,5%. W szczególności, przy zmianach napięcia na obciążeniu od 0 do 8 V, zmiana prądu powodowana efektem Early'ego wynosi 0,5%, a zmiana prądu wywołana zmianami temperatury tranzystora jest równa 0,2%. Dodatkowo, zmiany  $h_{FE}$  powodują 0,05% zmian prądu (zauważ, że dzielnik jest „sztywny”). Tak więc, zmiany te są przyczyną nieidealności źródła prądowego. Prąd wyjściowy zależy nieznacznie od napięcia i dlatego impedancja źródła nie jest nieskończona. Później poznamy metody pozwalające obejść tę trudność.

2.  $U_{BE}$  oraz  $h_{FE}$  zależą od temperatury. Powoduje to zmiany prądu wyjściowego przy zmianach temperatury otoczenia. Ponadto, wraz ze zmianami napięcia na obciążeniu (na skutek zmiany mocy wydzielanej w tranzystorze), zmienia się



Rysunek 2.23.

Jedna z metod temperaturowej kompensacji źródła prądowego

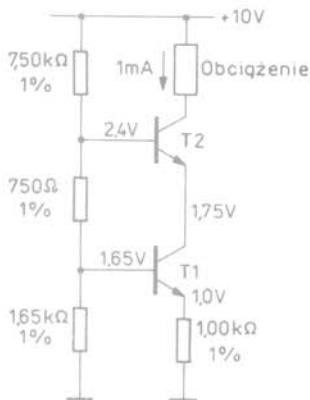
temperatura złącza tranzystora, co powoduje, że zachowanie rzeczywistego źródła prądowego odbiega od zachowania się źródła idealnego. Zmiany  $U_{BE}$  powodowane zmianami temperatury otoczenia mogą być skompensowane w układzie źródła prądowego, przedstawionym na rys. 2.23, w którym spadek napięcia na złączu baza-emiter tranzystora T2 jest kompensowany przez odpowiedni spadek napięcia we wtórniku z tranzystorem T1, o podobnej zależności od temperatury. Ponieważ tranzystor T1 nie może dostarczyć prądu do bazy T2, konieczne jest stosowanie rezystora  $R_3$ .

#### □ Usprawnianie źródła prądowego

Zazwyczaj skutki zmienności  $U_{BE}$ , wynikającej zarówno z zależności  $U_{BE}$  od temperatury (w przybliżeniu  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ), jak i od napięcia  $U_{CE}$  (efekt Early'ego, wyrażany z grubsza równaniem  $\Delta U_{BE} \approx -0,0001 \Delta U_{CE}$ ), mogą być minimalizowane przez wybranie tak dużej wartości potencjału emitera (powiedzmy, co najmniej 1 V), że zmiany  $U_{BE}$  rzędu dziesiątków miliwoltów nie spowodują dużych względnych zmian wartości napięcia na rezystorze emiterowym (pamiętajmy, że w rozważanym układzie potencjał bazy jest niezmienny. Na przykład, jeśli wybierzemy  $U_E = 0,1 \text{ V}$  (to znaczy, ustalimy  $U_B = 0,7 \text{ V}$ ), to otrzymamy 10% zmianę wartości prądu wyjściowego dla 10 mV zmiany  $U_{BE}$ . Natomiast dla  $U_E = 1 \text{ V}$  zmiana wartości prądu wyniesie 1% dla tej samej zmiany  $U_{BE}$ . Jednakże nie należy przesadzać. Pamiętajmy bowiem, że dolna granica zakresu dopuszczalnych wartości napięć wyjściowych źródła prądowego jest ustalana przez potencjał emitera. Jeśli potencjał emitera jest równy  $+5 \text{ V}$ , a źródło zasilane jest napięciem o wartości  $+10 \text{ V}$ , to zakres dopusz-

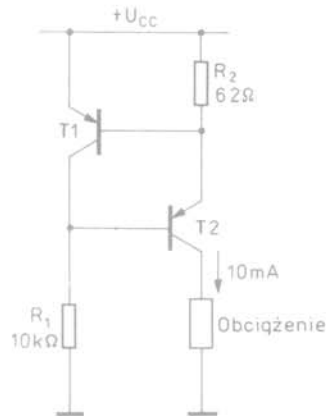
czalnych wartości napięcia na obciążeniu jest nieco mniejszy od 5 V (potencjał kolektora może zmieniać się od około  $U_E + 0,2$  [V] do  $U_{CC}$ , czyli od 5,2 V do 10 V).

Na rysunku 2.24 przedstawiono zmodyfikowane źródło prądowe o znacznie poprawionych parametrach. Zasada działania źródła prądowego z tranzystorem  $T1$  jest taka sama jak poprzednio, jedynie potencjał kolektora  $T1$  jest ustalony przez potencjał emitera tranzystora  $T2$ . Również taki sam jak poprzednio jest prąd płynący przez obciążenie, ponieważ prądy kolektora i emitera tranzystora  $T2$  są prawie równe (duża wartość  $h_{FE}$ ). Natomiast w tym układzie napięcie między kolektorem i emiterem tranzystora  $T1$  nie zmienia się przy zmianach napięcia na obciążeniu, co eliminuje zmiany  $U_{BE}$  powodowane efektem Early'ego oraz zmiany termiczne powodowane zmianami mocy wydzielanej w tranzystorze. Z danych pomiarowych wynika, że dla układu z tranzystorami typu 2N3565 wartość prądu wyjściowego zmienia się o 0,1%, gdy wartość napięcia na obciążeniu rośnie od 0 do 8 V. W celu utrzymania tej dokładności ważne jest, aby w układzie użyto stabilnych rezystorów o tolerancji rezystancji 1%, jak pokazano na rysunku. (Wybiegając nieco do przodu zauważymy, że taki układ znajduje zastosowanie jako wzmacniacz o dużej górnej częstotliwości granicznej i wtedy nazywany jest kaskodą.) Później zapoznamy się z układami źródeł prądowych ze wzmacniaczami operacyjnymi oraz sprzężeniem



Rysunek 2.24.

Źródło prądowe w układzie kaskody o zmniejszonej wrażliwości prądu wyjściowego na zmiany napięcia na obciążeniu



Rysunek 2.25.

Źródło prądowe o wydajności określonej przez napięcie  $U_{BE}$  tranzystora

zwrotnym, w których całkowicie usunięto problem zmian wartości napięcia  $U_{BE}$ .

Kłopoty powodowane zmiennością  $h_{FE}$  mogą być zminimalizowane przez stosowanie tranzystorów o dużej wartości  $h_{FE}$ . Wtedy udział prądu bazy w wartości prądu emitera jest stosunkowo mały.

Na rysunku 2.25 przedstawiono jeszcze jeden układ źródła prądowego, w którym wartość prądu wyjściowego nie zależy od wartości napięcia zasilania. W układzie tym wartość prądu wyjściowego jest określana, niezależnie od  $U_{CC}$ , przez wartość napięcia między bazą a emiterem tranzystora  $T1$  oraz wartość rezystancji  $R_2$ :

$$I_{wy} = U_{BE}/R_2$$

Rezystor  $R_1$  zapewnia przepływ prądu bazy tranzystora  $T2$ , ustalając wartość napięcia na kolektorze tranzystora  $T1$  mniejszą od wartości napięcia zasilania  $U_{CC}$  o podwójny spadek napięcia na przewodzącym złączu diodowym i tym samym eliminując wpływ efektu Early'ego na wartość prądu wyjściowego źródła. Układ ten nie jest skompensowany termicznie. Wartość napięcia na  $R_2$  maleje w przybliżeniu o 2,1 mV/°C, powodując, że wartość prądu wyjściowego maleje o 0,3%/°C.

## 2.07. Wzmacniacz ze wspólnym emiterem

Rozważmy układ źródła prądowego z obciążeniem w postaci rezystora (rys. 2.26). Napięcie między kolektorem a masą jest równe:

$$U_C = U_{CC} - I_C R_C$$

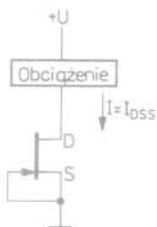
TABLICA 3.3. PARY ZŁĄCZOWYCH TRANZYSTORÓW POŁOWYCH Z KANAŁEM  $n$

Oznaczenie	$U_{IO}$ max	Dryf tempera- turowy max	$I_{DSS}$ ( $U_{DG} = 20V$ ) max	$CMRR$ min	$U_{GS(OFF)}$ $U_P$		$e_n$ (10 Hz) max	$C_{rss}$ ( $U_{DG} = 10V$ ) max	Uwagi
	[mV]	[ $\mu V/^\circ C$ ]	[pA]	[dB]	min [V]	max [V]	[ $nV/\sqrt{Hz}$ ]	[pF]	
U421	10	10	0,2	90	0,4	2	50	1,5	Siliconix ogólnego przeznacze- nia, mały dryf popularny
2N3954A	5	5	100	—	1	3	150 <sup>a)</sup>	1,2	
2N3955	5	25	100	—	1	4,5	150 <sup>a)</sup>	1,2	
2N3958	25	—	100	—	1	4,5	150 <sup>a)</sup>	1,2	
2N5196	5	5	15	—	0,7	4	20 <sup>b)</sup>	2	
2N5520	5	5	100	100	0,7	4	15	5	
2N5906	5	5	2	90 <sup>b)</sup>	0,6	4,5	70 <sup>b)</sup>	1,5	
2N5911	10	20	100	—	1	5	20 <sup>c)</sup>	1,2	
2N6483	5	5	100	100	0,7	4	10	3,5	
NDF9406	5	5	5	120	0,5	4	30	0,1	
2N5452	5	5	100 <sup>d)</sup>	—	1	4,5	20 <sup>b)</sup>	1,2 <sup>e)</sup>	mała wartość prądu upływności bramki niski poziom szumu w zakresie dużych często- tliwości
2SK146	20	—	1000 <sup>d)</sup>	—	0,3	1,2	1,3	15 <sup>b)</sup>	kaskoda; mała wartość $C_{rss}$ ultraniskoszumny

<sup>a)</sup> dla 100 Hz, <sup>b)</sup> dla 1 kHz, <sup>c)</sup> dla 10 kHz, <sup>d)</sup> dla 30 V, <sup>e)</sup> dla 20 V, <sup>f)</sup> wartość typowa

### 3.06. Źródła prądowe z tranzystorów JFET

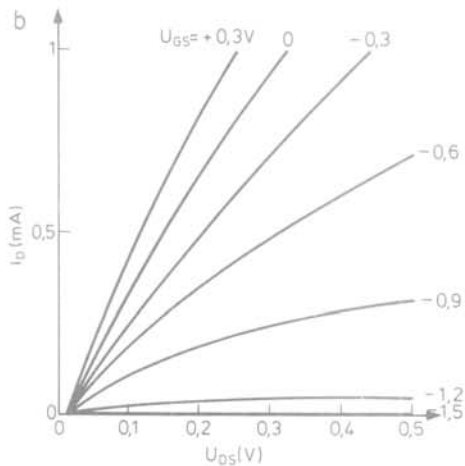
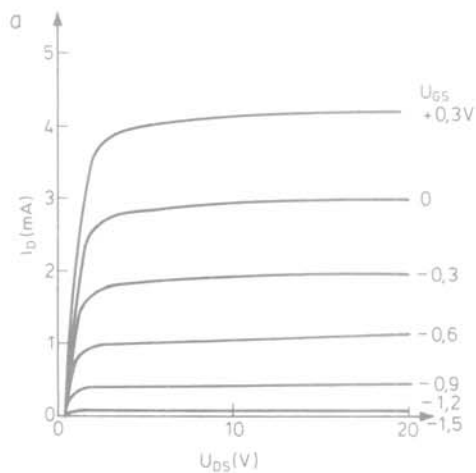
Źródła prądowe wykonane ze złączowych tranzystorów polowych są stosowane zarówno wewnątrz układów scalonych (szczególnie we wzmacniaczach operacyjnych) jak też w konstrukcjach realizowanych z elementów dyskretnych. Najprostszy układ takiego źródła prądowego przedstawiono na rys. 3.16. W tym zastosowaniu wybór złączowego tranzystora polowego, a nie tranzystora MOS, wiąże się z możliwością pracy układu dla zerowej wartości napięcia bramka-źródło (tranzystor złączowy pracuje ze zubożaniem kanału). Z zamieszczonych charakterystyk drenowych tranzystora polowego (rys. 3.17) wynika, że prąd



Rysunek 3.16.

drenu ma dość stałą wartość dla napięć  $U_{DS}$  o wartościach większych niż kilka woltów. Jednakże, ze względu na rozrzut produkcyjny wartości  $I_{DSS}$ , wydajności takiego źródła nie można przewidzieć. Na przykład,  $I_{DSS}$  tranzystora 2N5484 (typowy JFET z kanałem  $n$ ) może przybierać wartości między 1 mA a 5 mA. Mimo to przedstawiony układ pozostaje atrakcyjny ze względu na swoją prostotę; jest to wszakże dwukońcówkowe źródło prądu o stałej wartości. Jeśli ta prostota jest dla Ciebie najbardziej istotna, masz szczęście. W skali przemysłowej są produkowane diodowe stabilizatory prądu. Są to właśnie złączowe tranzystory polowe, których bramkę zwarto ze źródłem, posortowane w grupy stosownie do wydajności prądowej. Są to prądowe odpowiedniki diod Zenera, stosowanych do stabilizacji napięć stałych. Parametry elementów typu 1N5283 ÷ 1N5314:

Wartość stabilizowanego prądu	0,22 mA ÷ 4,7 mA
Tolerancja wartości prądu	10%
Współczynnik temperaturowy	$\pm 0,4\%/^\circ C$



**Rysunek 3.17.**  
Zmierzone charakterystyki wyjściowe ( $I_D = f(U_{DS})$ ;  $U_{GS} = \text{const}$ ) złączonego tranzystora polowego z kanałem  $n$  typu 2N5484

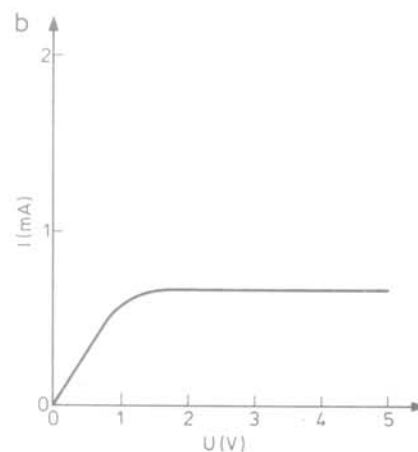
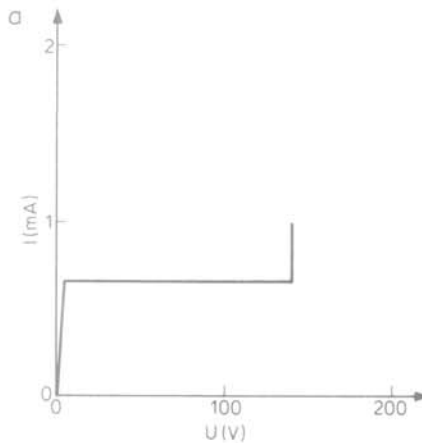
Zakres dopuszczalnych zmian wartości napięcia na źródle  $1 \div 2,5$  V (min.), 100 V (maks.)  
Niestołość wydajności źródła 5% (średnio)  
Rezystancja wewnętrzna  $1 \text{ M}\Omega$  (średnio) dla źródła 1 mA

Na rysunku 3.18 przedstawiamy charakterystyki źródła prądowego typu 1N5294 o wydajności 0,75 mA. Z rysunku 3.18a wynika, że stałość prądu jest dobra aż do napięcia o wartości równej napięciu przebicia (dla badanego egzemplarza było to 140 V). Natomiast z rys. 3.18b możemy określić minimalną wartość

napięcia na źródle, dla której źródło daje prąd o ustalonej wartości. Wartość ta jest mniej więcej równa 1,5 V. W podrozdziale 5.13 pokażemy jak można wykorzystać źródło tego typu w sprytnym układzie wytwarzającym falę trójkątną. Wartości najważniejszych parametrów diodowych źródeł prądowych zebrano w tabeli 3.4.

#### Automatyczne ustalanie punktu pracy źródła

Modyfikując omawiane źródło prądowe według rys. 3.19, można otrzymać źródło prądowe o dobieranej wydajności. Rezystor  $R$  automatycznie ustala punkt pracy tranzystora tak, że potencjał źródła jest równy  $I_D R$ . W wyniku tego napięcie  $U_{GS}$  przesuwa się w kierunku napięcia odcięcia i zmniejsza się wartość prądu drenu  $I_D$  (w porównaniu z przypadkiem  $R = 0$ ). Wartość

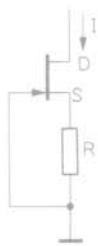


**Rysunek 3.18.**  
Charakterystyka diodowego stabilizatora prądu typu 1N5294

TABLICA 3.4. DWUKOŃCÓWKOWE STABILIZATORY PRĄDU<sup>a)</sup>

Oznaczenie	$I_p$ [mA]	Impedancja (25 V) min [MΩ]	$U_{min}$ ( $I > 0,8 I_p$ ) [V]
1N5283	0,22	25	1,0
1N5285	0,27	14	1,0
1N5287	0,33	6,6	1,0
1N5288	0,39	4,1	1,1
1N5290	0,47	2,7	1,1
1N5291	0,56	1,9	1,1
1N5293	0,68	1,4	1,2
1N5294	0,75	1,2	1,2
1N5295	0,82	1,0	1,3
1N5296	0,91	0,9	1,3
1N5297	1,0	0,8	1,4
1N5299	1,2	0,6	1,5
1N5302	1,5	0,5	1,6
1N5304	1,8	0,4	1,8
1N5305	2,0	0,4	1,9
1N5306	2,2	0,4	2,0
1N5308	2,7	0,3	2,2
1N5309	3,0	0,3	2,3
1N5310	3,3	0,3	2,4
1N5312	3,9	0,3	2,6
1N5314	4,7	0,2	2,9

<sup>a)</sup> wszystkie mogą pracować do 100 V i 600 mW; zachowują się jak dioda po zmianie polaryzacji napięcia na przeciwną



Rysunek 3.19.

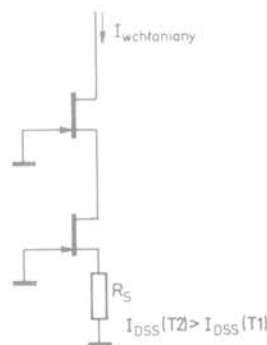
$R$  należy wybierać posługując się charakterystykami prądu drenu danego egzemplarza tranzystora. Użycie rezystora w układzie źródła prądowego pozwala dobrać właściwą wartość prądu oraz zmniejszyć nieoznaczoność tej wartości. Ponadto, układ z rezystorem jest lepszym źródłem prądowym (o większej wartości impedancji) niż układ bezrezystorowy, gdyż rezystor w obwodzie źródła tranzystora polowego realizuje prądowe sprzężenie zwrotne (będziemy się o tym uczyć w podrozdziale 4.07) oraz dlatego, że źródło prądowe z tranzystorem polowym ma tym lepsze parametry, im bardziej zaporowo polaryzuje się jego bramkę względem

źródła (widać to, może niezbyt dokładnie, na rys. 3.2 i 3.17, gdzie charakterystyki  $I_D$  w funkcji  $U_{DS}$  stają się bardziej płaskie w miarę zmniejszania wartości prądu  $I_D$ ). Należy jednak pamiętać, że ze względu na rozrzut produkcyjny, dla danej wartości  $U_{GS}$  wartość prądu  $I_D$  rzeczywistego tranzystora polowego może różnić się znacznie od wartości wyznaczonej na podstawie charakterystyk danego typu tranzystora. Jeśli zależy nam na ściśle określonej wydajności źródła prądowego, w obwodzie źródła tranzystora polowego należy zastosować potencjometr nastawny.

### ĆWICZENIE 3.1

Korzystając ze zmierzonych charakterystyk wyjściowych tranzystora 2N5484, przedstawionych na rys. 3.17, zaprojektuj źródło prądowe ze złączowym tranzystorem polowym o wydajności 1 mA. Następnie zastanów się nad konsekwencjami faktu, że wartość  $I_{DSS}$  takiego tranzystora, wybranego losowo, może zmieniać się od 1 mA do 5 mA.

Wydajność źródła prądowego ze złączowym tranzystorem polowym, nawet tego z rezystorem w obwodzie źródła, zależy od wartości napięcia wyjściowego. Oznacza to, że wartość impedancji wewnętrznej źródła prądowego jest skończona, zamiast oczekiwanej nieskończonej. Na przykład, z charakterystyk przedstawionych na rys. 3.17 można oszacować, że przyrost wartości prądu drenu  $I_{DSS}$  tranzystora 2N5484 (dla bramki zwartej ze źródłem) dla zmiany wartości napięcia drenu od 5 V do 20 V wyniesie 5%. Po włączeniu rezystora w obwód źródła tranzystora przyrost ten zmniejszy się do 2%.



Rysunek 3.20.

Źródło prądu pochłanianego z polowymi tranzystorami złączowymi połączonymi w układ kaskody (górny tranzystor —  $T2$ , dolny  $T1$ )

W celu poprawienia parametrów źródła prądowego można zastosować układ podobny do przedstawionego na rys. 2.44. W wersji z tranzystorami polowymi wygląda on tak jak na rys. 3.20. Pomysł (podobnie jak w przypadku układu z tranzystorami bipolarnymi) polega na zastosowaniu drugiego tranzystora polowego, którego zadaniem jest utrzymywanie stałej wartości napięcia dren-źródło tranzystora stanowiącego źródło prądowe. Tranzystor  $T1$  pracuje w układzie zwykłego źródła prądowego z rezystorem w obwodzie źródła. Tranzystor  $T2$  ma większą wartość prądu  $I_{DSS}$  niż  $T1$ . Jest on połączony szeregowo ze źródłem prądowym i przepuszcza prąd drenu tranzystora  $T1$  do obciążenia, utrzymując przy tym stałą wartość potencjału na drenie tego tranzystora. Potencjał drenu  $T1$  jest równy wartości bezwzględnej napięcia bramka-źródło tranzystora  $T2$ , które wymusza prąd drenu  $T2$  o wartości równej prądowi  $I_{DSS}$  tranzystora  $T1$ . Tak więc tranzystor  $T2$  nie przepuszcza zmian napięcia z wyjścia układu do drenu  $T1$ . Ostatecznie na drenie  $T1$  nie ma żadnych zmian napięcia i, co za tym idzie,  $T1$  pobiera prąd o stałej wartości. Jeśli powtórnie spojrzymy na wtórnik prądowy Wilsona (rys. 2.48), zauważymy, że wykorzystano w nim ten sam sposób stabilizacji napięcia na źródle prądowym.

W przedstawionym układzie można rozpoznać kaskodę, tym razem wykonaną z tranzystorów polowych, którą stosuje się głównie w celu usunięcia efektu Millera (patrz podrozdział 2.19). Kaskoda wykonana z tranzystorów polowych jest prostsza niż kaskoda wykonana z tranzystorów bipolarnych, gdyż nie są potrzebne żadne specjalne sposoby ustalania punktu pracy górnego tranzystora polowego. Ponieważ jest to tranzystor ze zubożanym kanałem, wystarczy po prostu dołączyć jego bramkę do masy (porównaj z rys. 2.74).

### ĆWICZENIE 3.2

Wyjaśnij, dlaczego wartość  $I_{DSS}$  górnego tranzystora kaskody musi być większa niż wartość prądu  $I_{DSS}$  dolnego tranzystora. W rozwiązaniu problemu może pomóc początkowe założenie, że kaskoda nie zawiera rezystora w obwodzie źródła dolnego tranzystora.

Trzeba uświadomić sobie, że stosując tranzystory bipolarne można uzyskać znacznie lepszą określoność i stałość wydajności źródła prądowego. Jeszcze lepsze źródła prądowe wykonywane są z użyciem wzmacniaczy operacyjnych; tym

zajmiemy się w następnym rozdziale. Na przykład, wydajność źródła prądowego z tranzystorem polowym może zmieniać się o 5% dla typowych zmian temperatury i napięcia na obciążeniu, nawet po dobraniu właściwej wartości prądu wyjściowego za pomocą rezystora nastawnego, znajdującego się w obwodzie źródła. W tych samych warunkach bez większych trudności można otrzymać 0,5% zmienność wydajności źródła prądowego wykonanego z użyciem tranzystora bipolarnego lub wzmacniacza operacyjnego, wliczając w tę zmienność zarówno oddziaływanie temperatury i napięcia na obciążeniu jak i rozrzut produkcyjny.

### 3.07. Wzmacniacze z tranzystorami polowymi

Układy z tranzystorami polowymi: wtórnik źródłowe oraz wzmacniacze ze wspólnym źródłem są odpowiednikami układów z tranzystorami bipolarnymi: wtórników emiterowych i wzmacniaczy ze wspólnym emiterem, które omówiliśmy w poprzednim rozdziale. Jednak brak prądu w obwodzie bramki pozwala na realizację wzmacniaczy o bardzo dużej wartości impedancji wejściowej. Takie wzmacniacze są niezbędne w przypadku wzmacniania sygnałów ze źródeł o dużej impedancji wewnętrznej, spotykanych w praktyce pomiarowej i przy przetwarzaniu sygnałów nieelektrycznych. W szczególnych sytuacjach konstruuje się wtórnik i wzmacniacze z dyskretnych tranzystorów polowych. Jednak w większości przypadków korzystniej jest użyć gotowych wzmacniaczy operacyjnych ze stopniem wejściowym wykonanym z tranzystorów polowych. Niezależnie od sposobu wykonania układu, dobrze jest wiedzieć jak taki układ działa.

Do ustalania punktu pracy złączonego tranzystora polowego wygodnie jest zastosować przedstawiony wcześniej, przy omawianiu źródła prądowego (podrozdział 3.06), układ z automatycznym ustalaniem potencjału źródła, przy czym między bramkę a masę należy włączyć rezystor ustalający właściwy potencjał bramki (rys. 3.21). Punkt pracy tranzystora MOS musi być ustalony, podobnie jak dla tranzystora bipolarnego, za pomocą dzielnika rezystorowego, dołączonego do zasilacza obwodu drenu lub przez zasilanie napięciami o obu polaryzacjach. Rezystor ustalający potencjał bramki może mieć dużą wartość rezystancji (rzędu  $M\Omega$ ), gdyż wartość prądu upływnościowego w obwodzie bramki jest rzędu nA.