



Politechnika Wrocławska
Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki



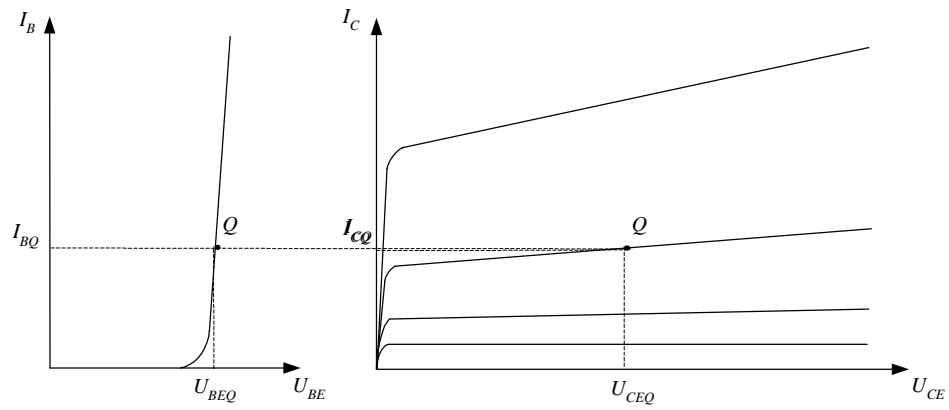
Układy zasilania tranzystorów

Wrocław 2006



Punkt pracy tranzystora

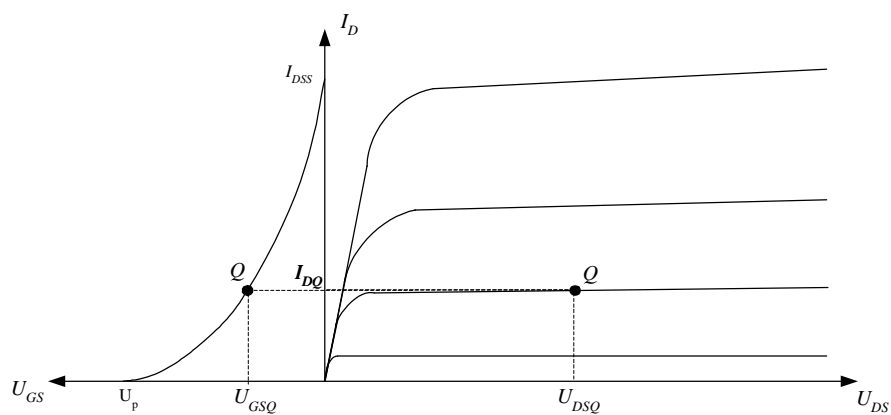
Tranzystor bipolarny





Punkt pracy tranzystora

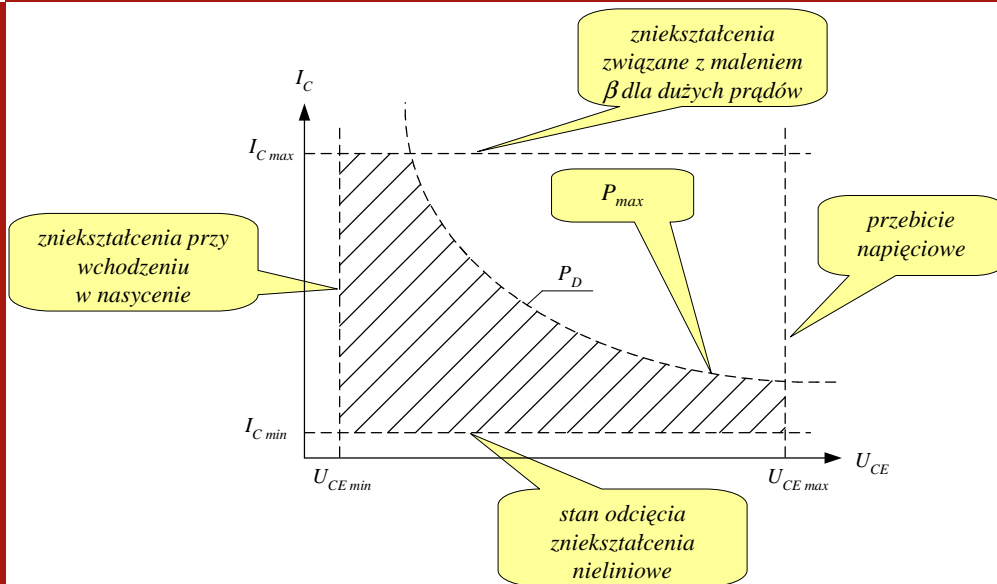
Tranzystor unipolarny





Dopuszczalny obszar pracy (safe operating conditions SOA)

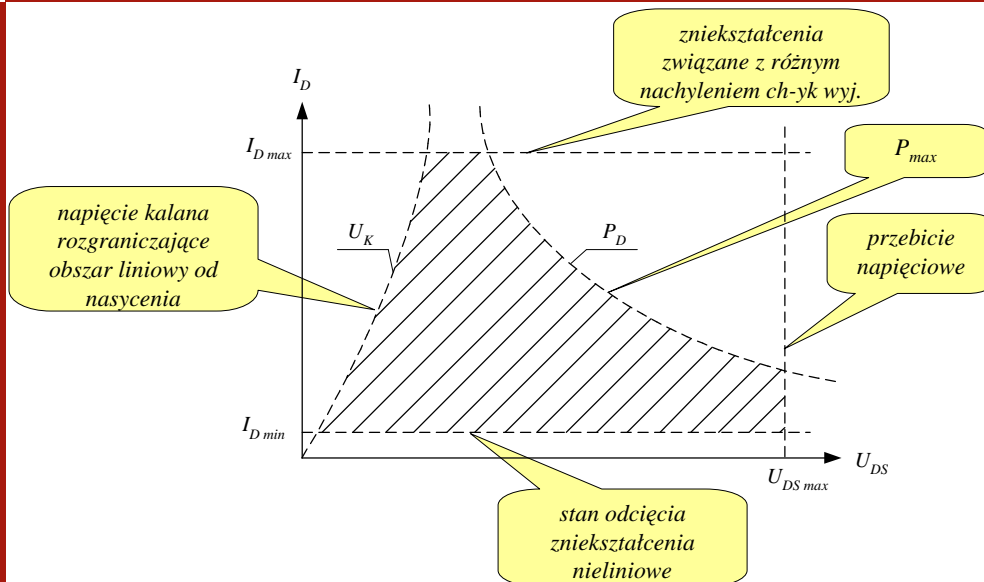
Tranzystor bipolarny





Dopuszczalny obszar pracy (safe operating conditions SOA)

Tranzystor unipolarny





Dobór punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Od doboru punktu pracy zależą prawie wszystkie parametry projektowanego układu. Optymalny dobór p.p. jest kompromisem pomiędzy wymaganiami stawianymi układowi:

- ⇒ wielkość wzmocnienia
- ⇒ ograniczenia mocy wydzielanej w tranzystorach (stabilność temperaturowa)
- ⇒ poziomy napięć i prądów wyjściowych układu
- ⇒ ograniczenia częstotliwościowe (pasmo pracy)
- ⇒ zniekształcenia nieliniowe
- ⇒ poziom szumów
- ⇒ poziom impedancji wejściowej i wyjściowej
- ⇒ warunki zasilania – stabilizowane, niestabilizowane, bateryjne



Dobór punktu pracy ze względu na zastosowania

Tranzystor bipolarny

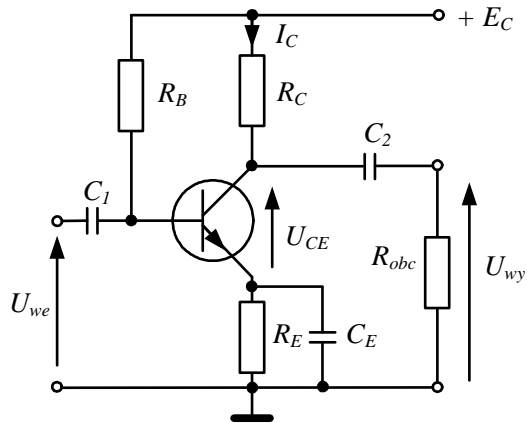
Zastosowanie	I_C	U_{CE}
Stopnie wejściowe o małym poziomie szumów	(20 – 200) μ A	(1-5) V
Stopnie pośrednie wzmacniaczy małych sygnałów	(0,2 – 2) mA	(3-10) V
Wzmacniacze akustyczne średniej mocy	(0.1 – 1) A	(5-12) V
Wzmacniacze akustyczne dużej mocy	(2 – 10) A	(20-100) V



Statyczna i dynamiczna praca pracy

Tranzystor bipolarny

Prosta pracy to linia na charakterystyce wyj. po której przemiesza się p.p. gdy zmieniają się jego warunkiysterowania.



$$I_C = I_{CQ} + i_c$$

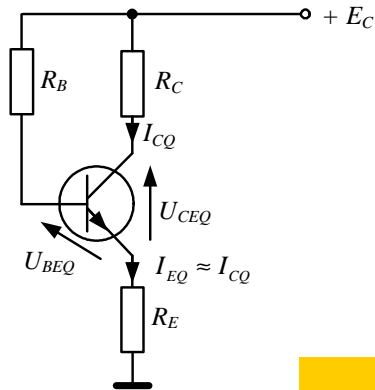
$$U_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$$



Statyczna i dynamiczna praca pracy

Tranzystor bipolarny

Statyczna praca pracy dla prądu stałego



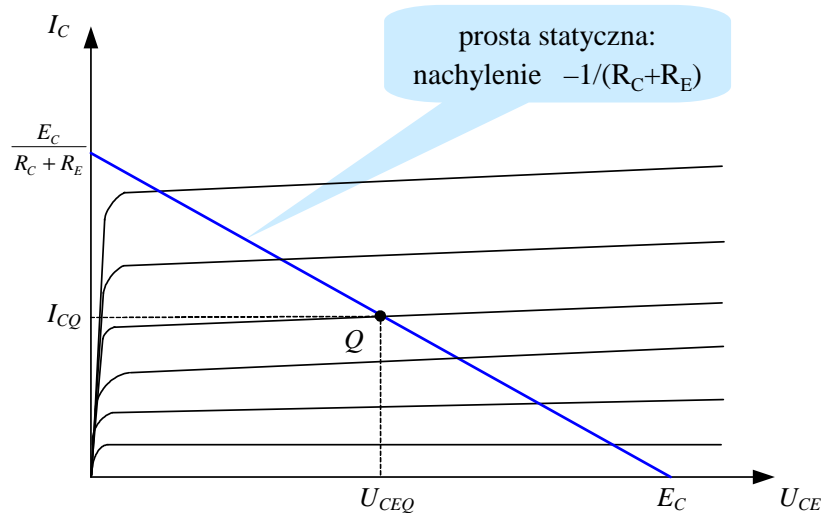
$$I_{CQ}(R_C + R_E) + U_{CEQ} = E_C$$

$$I_{CQ} = \frac{E_C}{R_C + R_E} - \frac{U_{CEQ}}{R_C + R_E}$$



Statyczna i dynamiczna prosta pracy

Tranzystor bipolarny

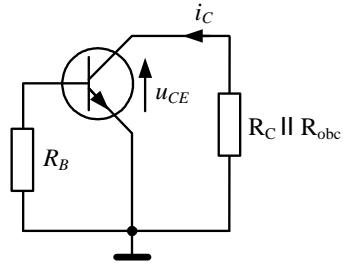




Statyczna i dynamiczna praca pracy

Tranzystor bipolarny

Dynamiczna praca pracy dla prądu zmiennego



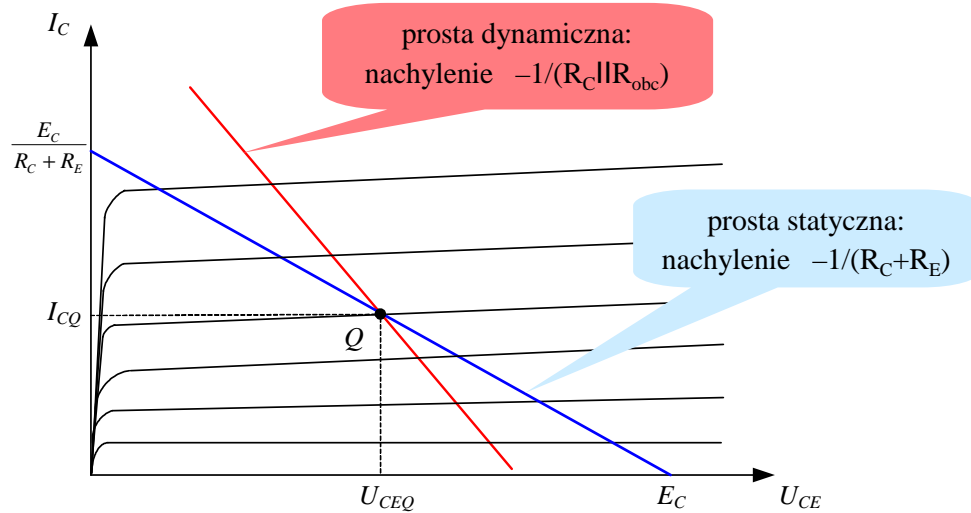
$$i_C (R_C \parallel R_{obe}) = u_{CE}$$

$$I_C = -\frac{U_{CE}}{R_C \parallel R_{obe}} + I_{CQ} + \frac{U_{CEQ}}{R_C \parallel R_{obe}}$$



Statyczna i dynamiczna prosta pracy

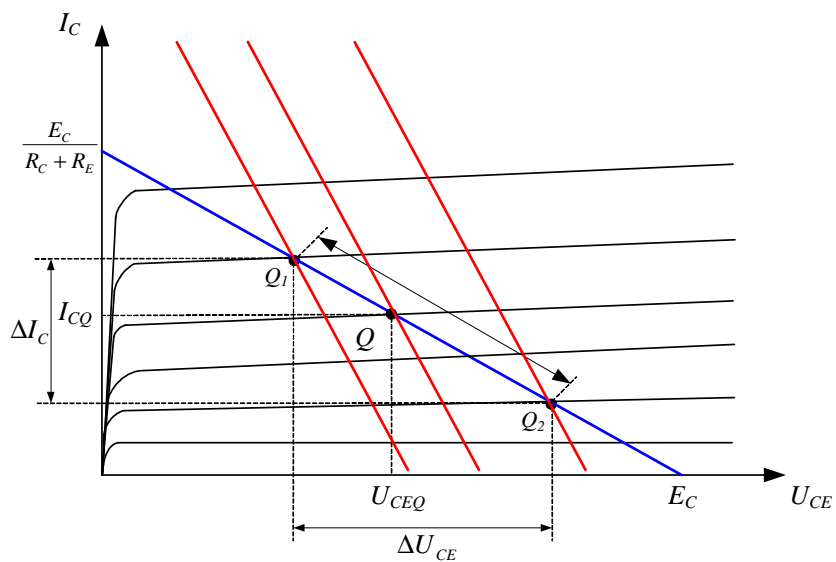
Tranzystor bipolarny





Stabilność punktu pracy

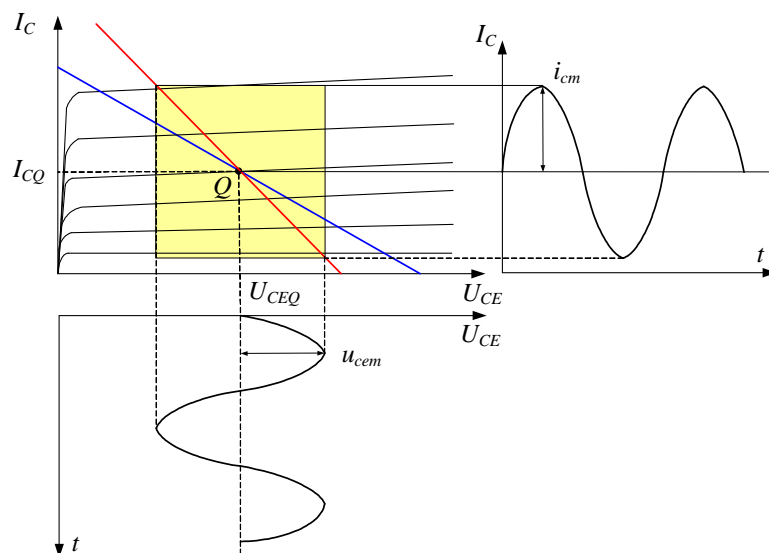
Tranzystor bipolarny





Stabilność punktu pracy

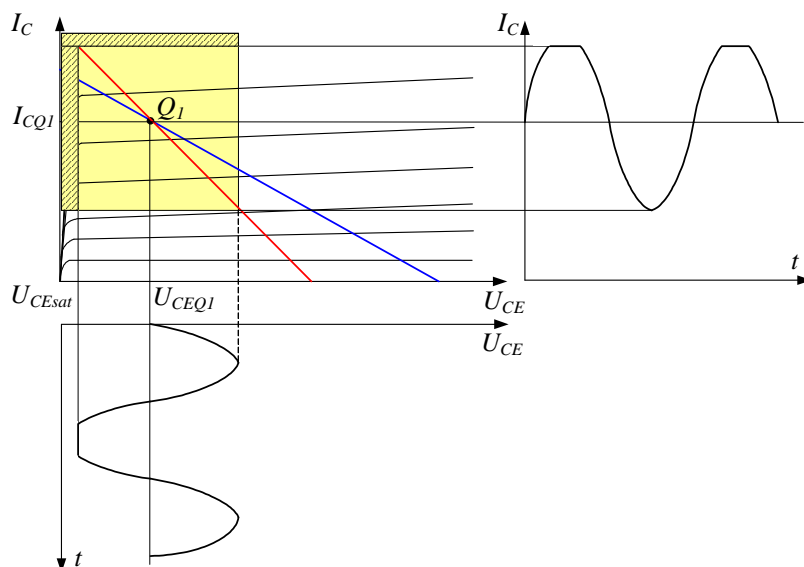
Tranzystor bipolarny





Stabilność punktu pracy

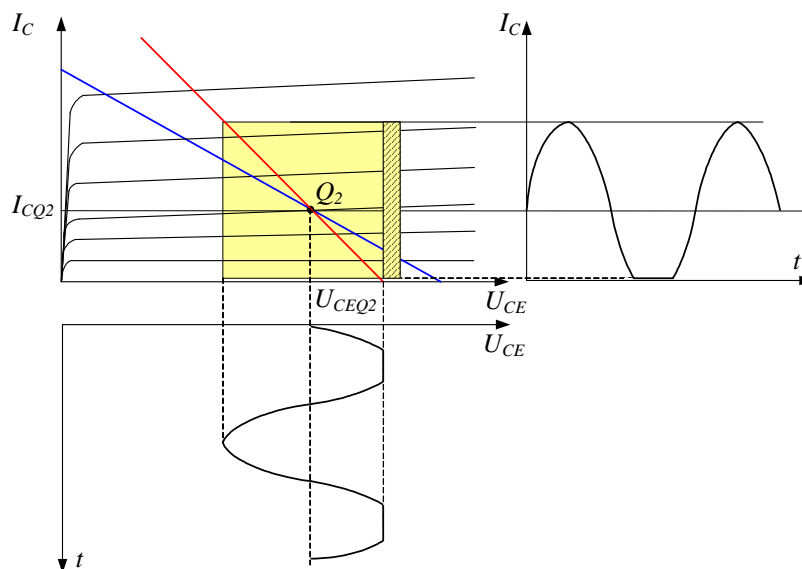
Tranzystor bipolarny





Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny





Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Zmiana temperatury ma wpływ bezpośrednio na 3 parametry tranzystora

$$\beta_0(T) = \beta_0(T_0)[1 + \gamma(\Delta T)] ; \quad \gamma = 0,05 \frac{1}{^\circ C}$$

$$U_{BE}(T) = U_{BE}(T_0) - c(\Delta T) ; \quad c = 2,3 \frac{mV}{^\circ C}$$

$$I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_0)e^{b(\Delta T)} ; \quad b = \frac{1}{14^\circ C}$$

Wielkości te decydują o wartości I_{CQ}

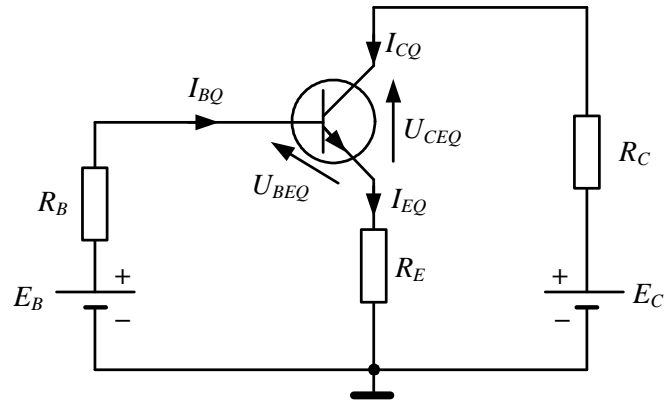
$$I_{CQ} = f(\beta_0, U_{BE}, I_{CB0})$$



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Analiza ogólnego, dwubaterijnego układu zasilania tranzystorów bipolarnych

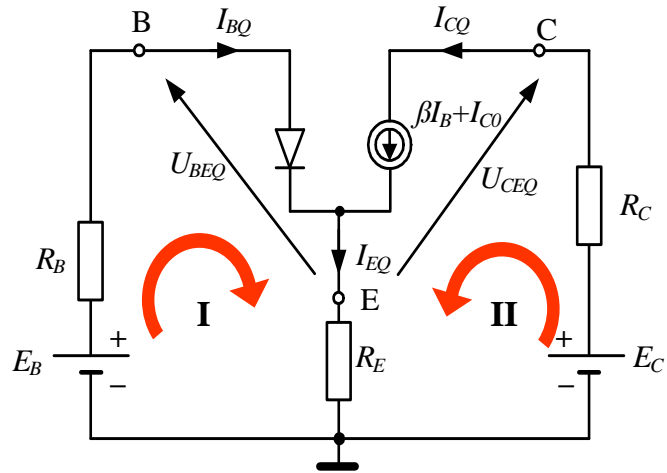




Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Zastępujemy tranzystor uproszczonym modelem Ebersa - Molla





Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Dla oczka wejściowego (I) możemy zapisać

$$E_B = I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = U_{BE} + I_C R_E + I_B (R_B + R_E)$$

Wykorzystując zależność

$$I_B = \frac{I_C - (\beta_0 + 1)I_{CB0}}{\beta_0}$$

otrzymujemy:

$$I_C = \frac{(E_B - U_{BE})\beta_0 + (R_B + R_E)(\beta_0 + 1)I_{CB0}}{R_B + (\beta_0 + 1)R_E}$$



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Dla oczka wyjściowego (II) możemy zapisać

$$E_{CC} = I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E = U_{CE} + I_C (R_C + R_E) + I_B R_E$$

Przekształcając otrzymujemy:

$$U_{CE} = E_{CC} - I_C \left(R_C + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} R_E \right) + R_E \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} I_{CB0}$$



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Przyrost I_C wywołany przyrostami poszczególnych wielkości można wyznaczyć w postaci różniczki zupełnej:

$$dI_C = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CB0}} dI_{CB0} + \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} dU_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial \beta_0} d\beta_0$$

Zastępując różniczki przyrostami:

$$\Delta I_C \approx S_i \Delta I_{CB0} - S_u \Delta U_{BE} + S_\beta I_C \frac{\Delta \beta_0}{\beta_0}$$



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

gdzie współczynniki stabilizacji prądu kolektora:

$$S_i = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CB0}} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} \bigg|_{\substack{U_{BE} = \text{const}, \\ \beta = \text{const}}} \quad \Delta I_{CB0} = I_{CB0}(T_1) - I_{CB0}(T_0)$$

$$S_u = - \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \approx - \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}} \bigg|_{\substack{I_{CB0} = \text{const}, \\ \beta = \text{const}}} \quad \Delta U_{BE} = U_{BE}(T_1) - U_{BE}(T_0)$$

$$S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta_F} \frac{\beta_0}{I_C} \approx \frac{\frac{\Delta I_C}{I_C}}{\frac{\Delta \beta_0}{\beta_0}} \bigg|_{\substack{U_{BE} = \text{const}, \\ I_{CB0} = \text{const}}} \quad \Delta \beta_0 = \beta_0(T_1) - \beta_0(T_0)$$



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Współczynniki S_i , S_u , S_β wyznaczmy różniczkując wyrażenie na prąd kolektora:

$$S_i = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CB0}} = \frac{R_B + R_E}{R_E + \frac{R_B}{\beta_0}} \approx 1 + \frac{R_B}{R_E}$$

$$S_u = - \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} = \frac{I}{R_E + \frac{R_B}{\beta_0}} \approx \frac{I}{R_E}$$

$$S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta_0} \frac{\beta_F}{I_C} = \frac{S_i}{\beta_0}$$

Zależności przybliżone obowiązują, gdy $R_B/\beta_0 \gg R_E$, a tak jest w większości układów praktycznych.



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Aby współczynniki stabilizacji były jak najmniejsze należy stosować:

- jak największego wartości R_E ,
- jak najmniejszej wartości R_B ,
- tranzystory o jak największej wartości β .

Zmianę napięcia U_{CE} spowodowaną zmianą temperatury można obliczyć z zależności :

$$\Delta U_{CE} = - \Delta I_{CE} (R_C + R_E)$$

Zbyt duża wartość R_E powoduje wzrost napięcia zasilania E_C oraz zwiększenie zmian napięcia ΔU_{CE} z temperaturą.

Zatem wartość rezystora R_E jest ograniczona zarówno od góry jak i od dołu.



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Ograniczenie od góry:

a) maksymalne napięcie zasilania E_C , które może być zastosowane w układzie

$$R_E + R_C = \frac{E_{CC} - U_{CE}}{I_C} \leq \frac{E_{CC\max} - U_{CE}}{I_C}$$

b) warunki stabilizacji U_{CE} , które pogarszają się, gdy R_E rośnie

$$R_E + R_C = \leq (R_E + R_C)_{\max} = - \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$

Ograniczenie od dołu:

warunki stabilizacji I_C , które pogarszają się, gdy R_E maleje.



Stabilność punktu pracy

Tranzystor bipolarny

Minimalną wartość R_E można wyznaczyć jako :

$$R_E \geq R_{E \min} = \frac{R_{B \max} \left(\Delta I_{CB0} + \frac{I_C}{\beta} \frac{\Delta \beta}{\beta} \right) - \Delta U_{EB}}{\Delta I_C - \Delta I_{CB0} - \frac{I_C}{\beta} \frac{\Delta \beta}{\beta}}$$

Zbyt małe wartości R_E i R_B powodują w praktyce nadmierne zmniejszenie wzmocnienia dla składowych zmiennych, ponieważ rezystancje te bocznikują wejście i wyjście tranzystora.

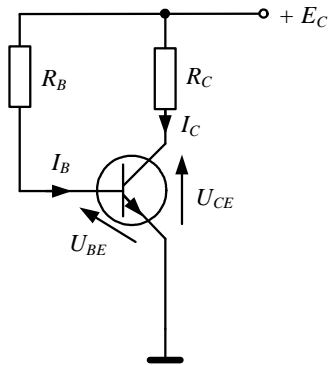
Dobierając R_E należy się kierować rozsądnym kompromisem pomiędzy:

- warunkami stabilizacji prądowej i napięciowej,
- wartością napięcia zasilania,
- wartością wzmocnienia układu,
- wartością rezystancji wejściowej i wyjściowej układu.



Układy zasilania tranzystorów układ ze stałym prądem bazy

Tranzystor bipolarny



$$I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{E_C}{R_B} = const$$

P.p. opisany jest równaniami:

$$I_C = \beta_0 \frac{E_C - U_{BE}}{R_B} + (\beta_0 + 1)I_{CB0} \approx \beta_0 \frac{E_C}{R_B}$$

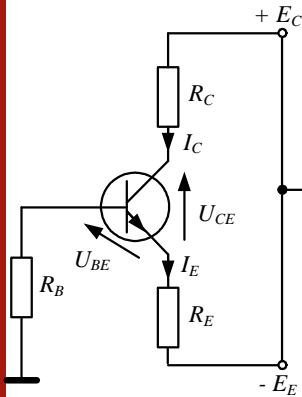
$$U_{CE} = E_C - I_C R_C$$

- konieczność stosowania dużych wartości R_B
- duże wartości współczynników stabilizacji (mało stabilny p.p.)



Układy zasilania tranzystorów układ ze stałym prądem emitera

Tranzystor bipolarny



$$I_E = \frac{E_E - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{E_E}{R_E} = \text{const}$$

P.p. opisany jest równaniami:

$$I_C = \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1} \frac{E_E - U_{BE}}{R_E} + I_{CB0} \approx \frac{E_E - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{E_E}{R_E}$$

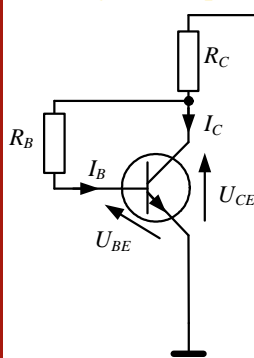
$$U_{CE} = E_C + E_E - I_C \left[R_C + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} R_E \right] + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} I_{CB0} R_E \approx \\ \approx E_C + E_E - I_C (R_C + R_E)$$

lepszta stabilizacja p.p. (wartości współczynników stabilizacji mniejsze)



Układy zasilania tranzystorów układ ze sprzężeniem kolektorowym

Tranzystor bipolarny



P.p. opisany jest równaniami:

$$I_C = \frac{\beta_0(E_C - U_{BE}) + I_{CB0}(\beta_0 + 1)(R_C + R_B)}{R_B + (\beta_0 + 1)R_C}$$

$$U_{CE} = E_C - \left(I_C + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} I_{CB0} \right) R_C$$

R_B pełni rolę sprzężenia zwrotnego N-S. Sprzężenie jest tym silniejsze im wartość R_B jest mniejsza.

Stabilizacja p.p. zależy od R_C co powoduje, że układ jest trudny w realizacji

Rola sprzężenia w układzie:

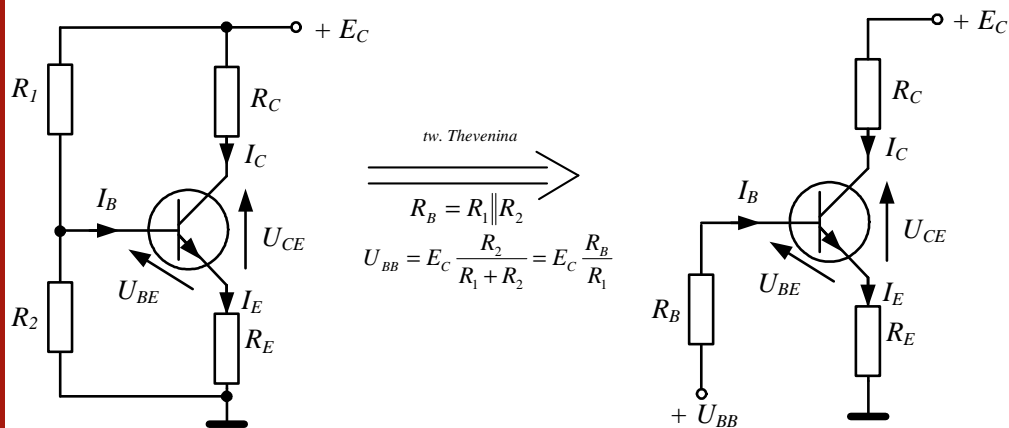
- gdy zmaleje I_C to zmaleje U_{RC} co pociąga za sobą wzrost U_{CE}
- wzrost U_{CE} powoduje wzrost U_{RB} co pociąga za sobą wzrost I_B
- wzrost I_B powoduje wzrost I_C co zwrótnie zwiększa U_{RC}
- wzrost U_{RC} zmniejsza U_{CE} stabilizując jego zmiany
- w rezultacie wzrost U_{CE} będzie mniejszy niż w układzie bez sprzężenia



Układy zasilania tranzystorów

układ potencjometryczny ze sprzężeniem emiterowym

Tranzystor bipolarny

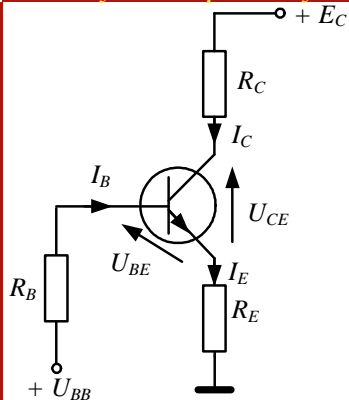




Układy zasilania tranzystorów

układ potencjometryczny ze sprzężeniem emiterowym

Tranzystor bipolarny



P.p. opisany jest równaniami:

$$I_C = \frac{\beta_0 (U_{BB} - U_{BE}) + I_{CB0} (\beta_0 + 1) (R_E + R_B)}{R_B + (\beta_0 + 1) R_E}$$

$$U_{CE} = \left(E_C + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} I_{CB0} R_E \right) - I_C \left(R_C + \frac{\beta_0 + 1}{\beta_0} R_E \right)$$

R_E pełni rolę sprzężenia zwrotnego P-S stabilizując I_E .

Rola sprzężenia w układzie:

gdy zmaleje I_E to zmaleje U_{RE} co pociąga za sobą wzrost U_{BE}
wzrost U_{BE} powoduje wzrost I_B co zwrotnie zwiększy I_E
w rezultacie I_C zmaleje mniej niż w układzie bez sprzężenia



Układy zasilania tranzystorów

Tranzystor bipolarny

Najlepsze własności stabilizacyjne ma układ z dwoma źródłami zasilania. Moc pobierana z dwóch źródeł jest z reguły mniejsza niż w przypadku układu z jednym źródłem. Wadą tych układów jest konieczność stosowania dwóch źródeł zasilania.

Dobre efekty daje zastosowanie układu ze SZ (kolektorowym, emiterowym i z obydwoma na raz).

Ze względów stabilizacyjnych układ ze stałym prądem bazy ma najgorsze właściwości.

Układ ze stałym prądem emitera charakteryzuje się najkorzystniejszymi właściwościami stabilizacyjnymi.



Układy zasilania tranzystorów układ z nieliniowymi elementami

Tranzystor bipolarny

Liniowe obwody zasilania (obwody z elementami liniowymi - rezystory) zapewniają stałość p.p. rzędu kilku – kilkunastu % przy zmianie temperatury 20-40°C.

W układach wymagających znacznie większej stałości prądu – rzędu 1-0,01%, stosuje się obwody zasilania z elementami nieliniowymi.

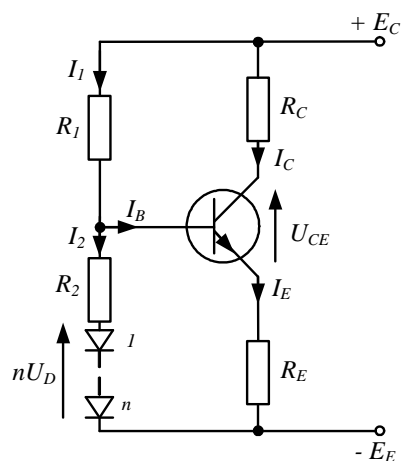
Przykłady takich układów to źródła prądowe zasilające stopnie wzmacniacza o sprzężeniach galwanicznych (np. we WO), prądowe źródła referencyjne itp..

W nieliniowych obwodach zasilania wykorzystuje się ogólnie zasadę kompensacji zmian parametrów stabilizowanego elementu zmianami innego elementu o bardzo podobnych właściwościach.



Układy zasilania tranzystorów układ z nieliniowymi elementami

Tranzystor bipolarny



Układ z kompensacją zmian U_{BE}
(niskie i średnie temperatury – pokojowe)

Analiza przy założeniu $I_1 = I_2$ oraz $I_E = I_C$
(pomijalny I_B)

$$I_C = \frac{R_2 E_C + n U_D R_1 - (R_1 + R_2) U_{BE}}{R_E (R_1 + R_2)}$$

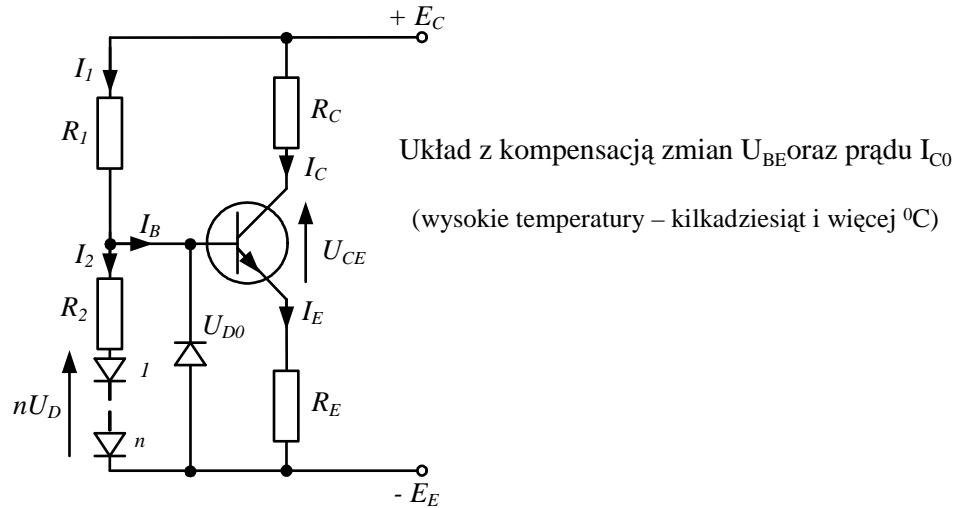
warunek pełnej kompensacji

$$\frac{R_2}{R_1} = n - 1$$



Układy zasilania tranzystorów układ z nieliniowymi elementami

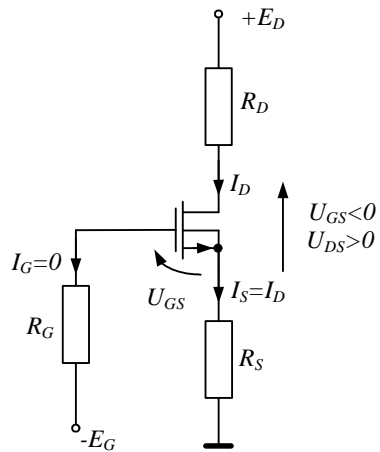
Tranzystor bipolarny





Układy zasilania tranzystorów układ z dwoma źródłami zasilania

Tranzystor unipolarny



$$U_{GS} = -E_G - I_D R_S$$

$$E_D = U_{DS} + I_D (R_S + R_D)$$

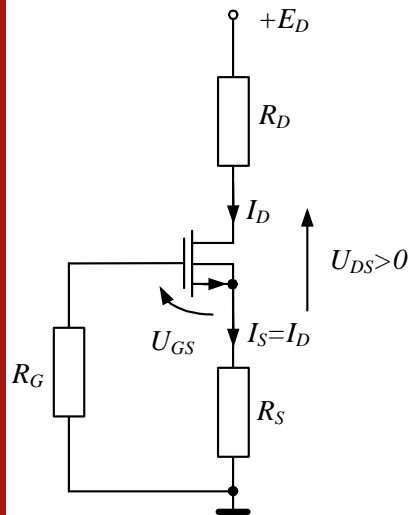
R_S stanowi sprzężenie podobnie jak R_E w bipolarnym.

Wadą tego układu jest konieczność stosowania dwóch źródeł zasilania.



Układy zasilania tranzystorów układ z automatyczną polaryzacją bramki

Tranzystor unipolarny



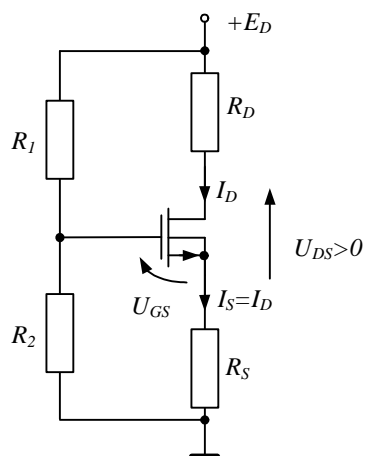
$$U_{GS} = -I_D R_S$$

$$E_D = U_{DS} + I_D (R_S + R_D)$$



Układy zasilania tranzystorów układ potencjometryczny

Tranzystor unipolarny



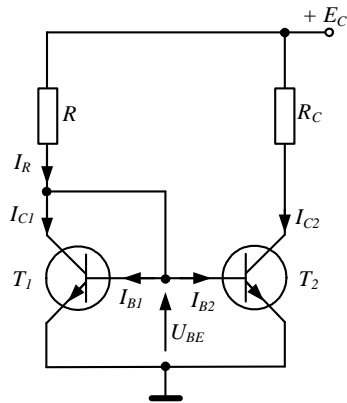
$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_D - I_D R_S$$

$$E_D = U_{DS} + I_D (R_S + R_D)$$



Układy zasilania tranzystorów w układach scalonych układ źródła prądowego

Tranzystor bipolarny



T₁ pracuje na granicy obszaru aktywnego $U_{CB}=0$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B \quad U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE} \quad I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$E_C = I_R R + U_{BE} \quad I_R = I_{C1} + 2I_B = I_C + 2I_B$$

$$I_C = \frac{E_C - U_{BE}}{R} - 2I_B = \frac{E_C - U_{BE}}{R} - 2 \frac{I_C}{\beta_0}$$

$$\text{jeśli } E_C \gg U_{BE}, \beta \gg 2 \quad I_C \approx \frac{E_C}{R}$$

$$I_{C2} = I_C \approx \frac{E_C}{R}$$

zatem p.p. T₂

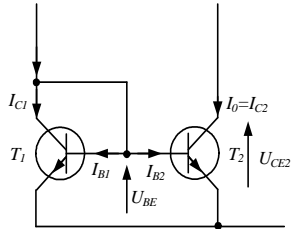
$$U_{CE2} = E_C - I_{C2} R_C \approx E_C \left(1 - \frac{R_C}{R} \right)$$

p.p. T₂ nie zależy od temp. ale
od różnicy parametrów między
T₁ a T₂



Układy zasilania tranzystorów w układach scalonych układ źródła prądowego – lustra prądowego

Tranzystor bipolarny



$$I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + 2I_B = I_0 + \frac{2I_{C1}}{\beta_0} = I_{REF}$$

stąd

$$I_0 = \frac{I_{REF}}{1 + 2/\beta_0} = I_{C1}$$

jeśli $\beta_0 \gg 1$

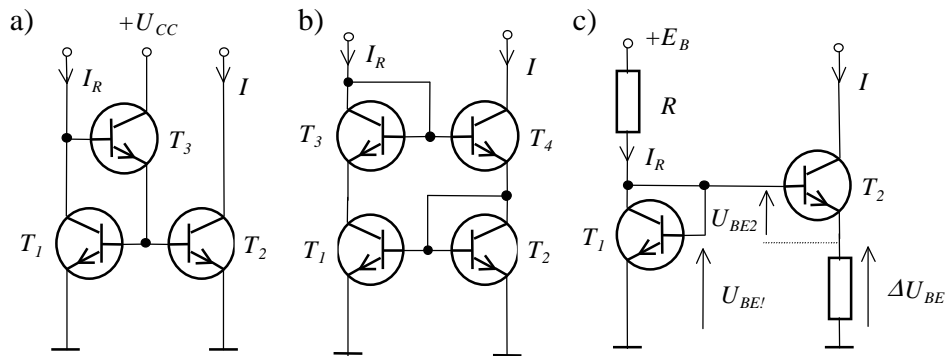
$$I_0 \approx I_{REF}$$

I_{REF} prąd odniesienia wymuszany przez źródło odniesienia (ang. *reference current*)



Układy zasilania tranzystorów w układach scalonych inne źródła prądowe z kompensacją nieliniową

Tranzystor bipolarny



$$I_R \left[1 - \frac{1}{\beta_{03}} \cdot \left(\frac{1}{\beta_{01}} + \frac{1}{\beta_{02}} \right) \right]$$

$$I \approx I_R \left(1 - \frac{2}{\beta_{04}(\beta_{02} + 2)} \right)$$

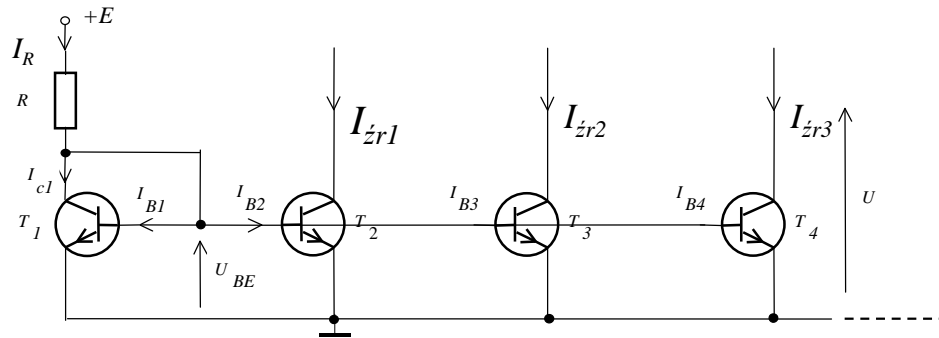
$$\frac{I_{E1}}{I_{E2}} = \exp \left(\frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{\Phi_T} \right)$$

$$I < \dots < I_R$$



Układy zasilania tranzystorów w układach scalonych źródło wymuszające kilka równych prądów

Tranzystor bipolarny

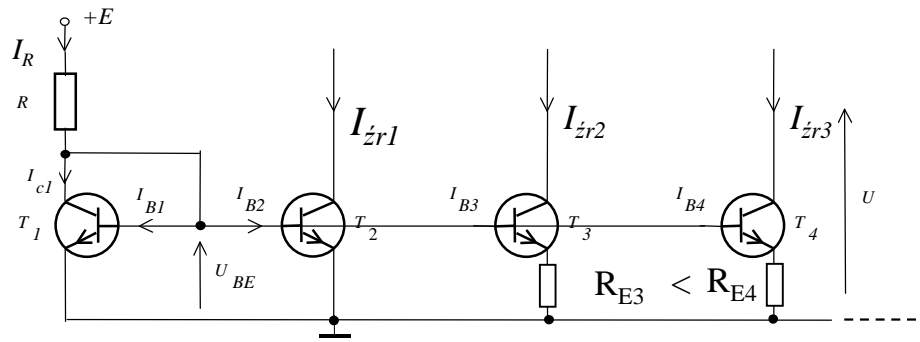


$$I_{\dot{z}r1} \approx I_{\dot{z}r2} \approx I_{\dot{z}r3} \approx I_R$$



Układy zasilania tranzystorów w układach scalonych źródło wymuszające kilka różnych prądów

Tranzystor bipolarny



$$I_{Zr3} < I_{Zr2} < I_{Zr1} \approx I_R$$