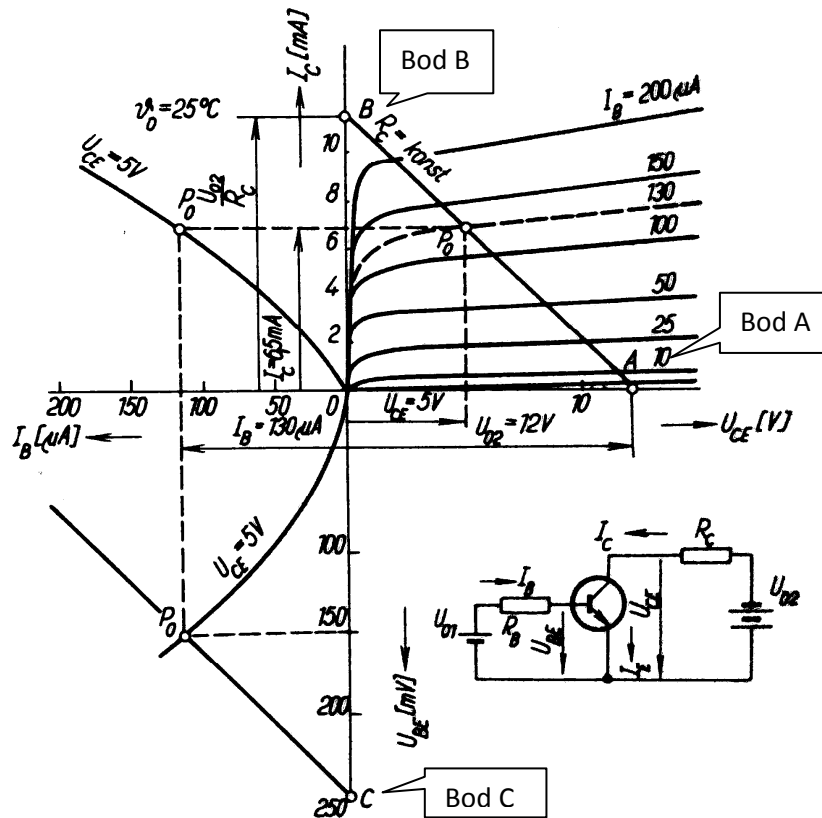


Nastavení klidového pracovního bodu tranzistoru

Poloha klidového pracovního bodu závisí na čtyřech obvodových veličinách, tj. na stejnosměrném vstupním a výstupním napětí a proudu. Např. v zapojení SE je bod P_0 na průsečíku zatěžovací přímky a výstupní charakteristiky, která odpovídá zvolenému proudu báze I_B (obr. 1). Zatěžovací přímka má lineární průběh a sestojí se pomocí bodů A, B, ve kterých protíná osy.



Obrázek 1

Pro dané napětí stejnosměrného zdroje U_{02} a zatěžovací odpor R_C v kolektorovém obvodu vychází

$$U_{02} = U_{CE} + R_C I_C$$

Bod A:

$$I_C = 0 \quad U_{CE} = U_{02}$$

Bod B:

$$U_{CE} = 0 \quad I_C = \frac{U_{02}}{R_C}$$

Z polohy bodu P_0 se určí tři nezávislé za čtyř obvodových veličin: kolektorového napětí U_{CE} , kolektorový proud I_C a proud báze I_B .

Grafická metoda umožňuje konstrukci dynamické charakteristiky a přenesení pracovního bodu P_0 do soustavy vstupních charakteristik. Z jeho polohy se určí čtvrtá obvodová veličina, tj. napětí na emitorovém přechodu U_{BE} .

Stejnosečné napětí U_{01} připojené na vstupní obvod tranzistoru, je v rovnováze s napětím na odporu R_B a napětím emitorového přechodu U_{BE} :

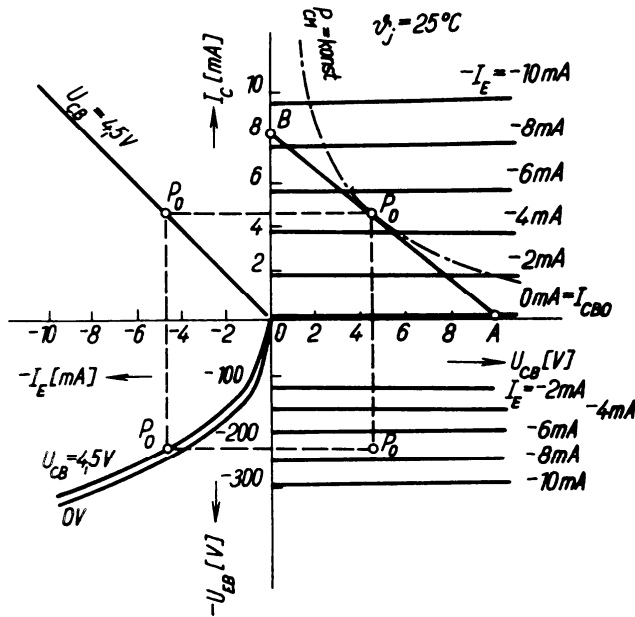
$$U_{01} = U_{BE} + R_B I_B$$

Grafickým obrazem rovnice je přímka, která prochází pracovním bodem P_0 a bodem C na ose napětí vstupních charakteristik.

Bod C:

$$I_B = 0 \quad U_{BE} = U_{01}$$

Klidová poloha pracovního bodu v zapojení SB se nastavuje obdobně jako v zapojení SE. Bod P_0 je průsečíkem výstupní charakteristiky se zatěžovací přímkou, která se sestrojí jako spojnice bodů A – B (obr. 2).



Obrázek 2

1. Při zvyšování teploty se zmenšuje odpor na přechodu emitor-báze a snižuje se napětí a snižuje se napětí U_{BE} (OBR. 3). Tím nezvětšuje proud báze a tím proud kolektoru. Typická teplotní změna napětí ΔU_{BE} je při kolektorovém proudy $I_C = 1 \text{ mA}$ asi $-2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ u germaniových tranzistorů a u křemíkových tranzistorů je to $-3,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Vliv změny ΔU_{BE} na změnu kolektorového proudy ΔI_C a tím i na změnu polohy klidového pracovního bodu, lze zmenšit odporem R_E zapojeným do emitorového obvodu (obr. 3). Odpor R_E se řadí do série s přechodem báze-emitor a tím zmenšuje změny napětí na přechodu. Na základě vztahů mezi veličinami vstupního obvodu tranzistoru lze odvodit závislost mezi ΔI_C a ΔU_{BE} , kterou lze zjednodušit na přibližný výraz

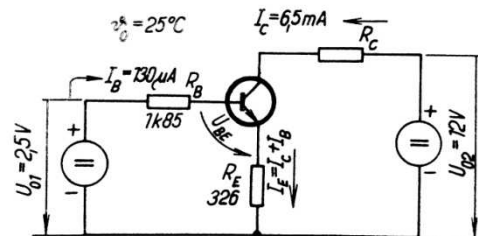
$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_E I_C}$$

Změna kolektorového proudy, a tím i posunutí pracovního bodu, je tím menší, čím větší je úbytek napětí na odporu R_E . Požadavek velkého napětí na emitorovém odporu způsobí

a) Vliv teploty na činnost tranzistoru

Klidová poloha pracovního bodu, a tím i provozní vlastnosti přístrojů osazených tranzistory, jsou značně ovlivňovány teplotou přechodů. Změna teploty sice způsobuje změnu všech parametrů tranzistoru, stejnosměrných i diferenciálních, nejvýrazněji se však projevuje na velikosti:

- napětí na přechodu mezi bází a emitem
- proudových zesilovacích činitelů nakrátko
- zbytkového proudy (u germaniových tranzistorů).



Obrázek 3

ovšem značnou ztrátu výkonu a potřebu zvětšit napětí zdroje U_{02} (obr. 3). Obvykle se volí $R_E I_E = (2 \div 4) \text{ V}$.

Je-li např. povolena 10% změna kolektorového proudu u germaniového tranzistoru, který pracuje v rozmezí teplot $(25 \div 75) ^\circ\text{C}$, pak pro danou velikost napětí $U_{BE} = 150 \text{ mV}$ při provozním rozptylu $(100 \div 200) \text{ mV}$ vychází

$$\Delta v = 75 - 25 = 45 ^\circ\text{C}.$$

Pro teplotní změnu $-2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ se vypočítá

$$\Delta U'_{BE} = 2,5 * 45 = 0,112 \text{ V}.$$

Změna napětí vzhledem k výrobnímu rozptylu

$$\Delta U''_{BE} = 200 - 100 = 100 \text{ mV}.$$

Celková změna napětí báze-emitor

$$\Delta U_{BE} = 0,112 + 1,1 = 0,212 \text{ V}.$$

Pro povolenou 10% změnu kolektorového proudu vychází

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_E I_E} = 0,1 ; \text{ z toho pak odvodíme, že } R_E I_E = \frac{\Delta U_{BE}}{0,1} = 2,1 \text{ V}.$$

2. Stejnoseměrný proudový zesilovací činitel nakrátko α_E se při zvyšování teploty obvykle zvětšuje. Běžně se uvádí, že při horní přípustné teplotě přechodu je jeho velikost α_{E2} dvojnásobná vzhledem k velikosti α_{E1} při pokojové teplotě. U tranzistorů s malou kolektorovou ztrátou se zesilovací činitel mění asi o $0,5 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ u křemíkových a o $(1,5 \div 2) \text{ } \%/^\circ\text{C}$ u germaniových tranzistorů. Pokud nejsou po ruce katalogové údaje, předpokládá se střední velikost $1 \text{ } \%/^\circ\text{C}$.

Závislost změny proudového zesilovacího činitele $\Delta \alpha_E$ na změně kolektorového proudu ΔI_C lze vypočítat pomocí zjednodušeného vzorce

$$\frac{\Delta I_C}{I} = \frac{\Delta \alpha_E}{\alpha_{E1} * \alpha_{E2}} \left(I + \frac{R_B}{R_E} \right)$$

Z výrazu plyne, že pro zvolený tranzistor se může vliv teplotních změn proudového zesilovacího činitele zmenšit pouze vhodně voleným poměrem R_B/R_E . Čím větší je odpor v emitorovém obvodu vzhledem k odporu v bázi, tím menší je změna kolektorového proudu.

Má-li např. germaniový tranzistor, kterému vyhovují charakteristiky na obr. 1, hodnoty

$$\alpha_{E1} = 50 \text{ (při } 25 ^\circ\text{C)} \quad \text{a} \quad \alpha_{E2} = 200 \text{ (při } 75 ^\circ\text{C)},$$

tak vychází

$$\frac{\Delta I_C}{I} = \frac{\Delta \alpha_E}{\alpha_{E1} * \alpha_{E2}} \left(I + \frac{R_B}{R_E} \right) = \frac{150}{50 * 200} \left(I + \frac{R_B}{R_E} \right).$$

Je-li opět povoleno, že změna α_E může způsobit 10 % změnu ΔI_C , vychází poměr odporů

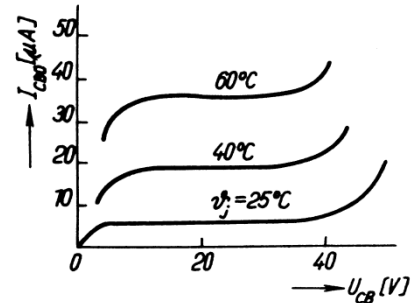
$$0,1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \left(1 + \frac{R_b}{R_e}\right), \quad \text{pak} \quad \frac{R_b}{R_e} = 5,65$$

3. Zbytkový proud tranzistoru vzniká tokem minoritních nosičů závěrně polarizovaného přechodem kolektor – báze. Jeho velikost téměř nezávisí na napětí, ale mění se exponenciálně s teplotou podle vztahu (obr. 4)

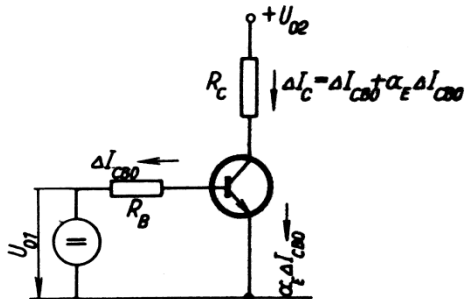
$$I_{CB0(v2)} = I_{CB0(v1)} \cdot e^{k(v2 - v1)}$$

Teplotní součinitel k je asi $(0,04 \div 0,1)/^\circ\text{C}$ u germaniových a $(0,01 \div 0,4)/^\circ\text{C}$ u křemíkových tranzistorů. Přibližně lze používat vztahu, podle kterého se zbytkový proud I_{CB0} při zvětšení teploty o 10°C zdvojnásobí.

Zbytkový proud bývá u kvalitních germaniových tranzistorů řádu několika μA . U křemíkových tranzistorů je podstatně menší, řádu nA.



Obrázek 4



Obrázek 5

V zapojení na obrázku 5 tvoří větev báze a emitoru proudový dělič. Zbytkový proud, který prochází kolektorovým odporem R_C se proto rozdělí na dvě složky:

- na složku I_{CB0} , která se uzavírá přes odpor R_B v obvodu báze,
- na složku αI_{CB0} , která přechází z báze na emitor a je proto zvětšena vlivem tranzistorového jevu.

Celkový kolektorový proud I_C je v zapojení SE dán vztahem (obr. 5)

$$I_C = \alpha_E I_B + I_{CB0} + \alpha_E I_{CB0} = \alpha_E I_B + I_{CB0}(1 + \alpha_E)$$

Při konstantním proudu báze vychází vztah mezi změnou kolektorového proudu ΔI_C a změnou zbytkového proudu ΔI_{CB0} ve tvaru

$$\Delta I_C = \Delta I_{CB0}(1 + \alpha_E)$$

Poměr změn obou proudů se nazývá činitel stabilizace S :

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}}$$

Činitel stabilizace závisí na zapojení tranzistoru. V zapojení SB platí vztahy:

$$I_C = \alpha_B I_E + I_{CB0} \quad \Delta I_C = \Delta I_{CB0}, \quad S = 1$$

V zapojení se společnou bází má činitel stabilizace nejmenší možnou velikost $S = 1$. Z hlediska teplotních změn zbytkového proudu se proto nemusí u tohoto zapojení zavádět stabilizační obvody.

V nestabilizovaném zapojení SE podle obr. 5 má činitel stabilizace značnou velikost:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} = (1 + \alpha_E)$$

Převažující vliv na velikost změny zbytkového proudu má složka $\alpha_E I_{CB0}$, která se uzavírá z báze do emitoru. Proto se obvykle zařazuje do emitorového obvodu odpor R_E , který ovlivňuje rozdělení zbytkového proudu v proudovém děliči vytvořeném odpory R_B a R_E . Stabilizace pracovního bodu bude tím účinnější, čím menší bude poměr R_B/R_E .

Pro vstupní obvod tranzistoru zapojeného podle obr. 3 vychází na základě Kirchhoffova zákona rovnice:

$$U_{01} = R_B I_B + U_{BE} + R_E (I_C + I_B)$$

Pomocí již odvozeného vztahu pro kolektorový proud se do rovnice dosadí za proud báze

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

Pak platí

$$U_{01} = R_B \frac{I_C - I_{CB0}(1 + \alpha_E)}{\alpha_E} + U_{BE} + R_E \left(I_C + \frac{I_C - I_{CB0}(1 + \alpha_E)}{\alpha_E} \right)$$

Po úpravě vychází

$$\alpha_E U_{01} = I_C [R_B + R_E (1 + \alpha_E)] - I_{CB0} [(R_B + R_E) (1 + \alpha_E)] + U_{BE} \alpha_E$$

Z hlediska změn kolektorového proudu ΔI_C a zbytkového proudu ΔI_{CB0} přechází rovnice na tvar

$$0 = \Delta I_C [R_B + R_E (1 + \alpha_E)] - \Delta I_{CB0} [(R_B + R_E) (1 + \alpha_E)]$$

Činitel stabilizace

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} = (1 + \alpha_E) \frac{R_B + R_E}{R_B + R_E (1 + \alpha_E)}$$

Připustí-li se zjednodušení za předpokladu, že $\alpha_E \gg 1$; $\alpha_E \gg \frac{R_B}{R_E}$ vychází

$$S = \text{přibližně } 1 + \frac{R_B}{R_E}$$

Poměrné změně kolektorového proudu odpovídá výraz

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = S \frac{\Delta I_{CBO}}{I_C} = \frac{\Delta I_{CBO}}{I_C} \left(1 + \frac{R_b}{R_e}\right)$$

Z výrazu vyplývá, že požadavek na malou změnu ΔI_C je v závislosti na ΔI_{CBO} ve výrazu $\left(1 + \frac{R_b}{R_e}\right)$ shodný s podmínkou pro zmenšení vlivu teplotních změn proudového zesilovacího činitele. Požadavek na velký úbytek napětí $R_E I_C$ se též shoduje s podmínkou, která byla odvozena pro zmenšení změny ΔI_C v závislosti na změně ΔU_{BE} . Z odvozeného výrazu též plyne, že poměrná změna kolektorového proudu je nepřímo závislá na klidové velikosti kolektorového proudu. To umožňuje zlepšit stabilizační účinky obvodu vhodně nastavenou polohou klidového pracovního bodu tranzistoru.

Při současném účinku všech tří změn (ΔU_{BE} , $\Delta \alpha_E$, ΔI_{CBO}) na poměrnou změnu kolektorového proudu platí vztah:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_E I_C} + \frac{\Delta \alpha_E}{\alpha_E} \left(1 + \frac{R_b}{R_e}\right) + \frac{\Delta I_{CBO}}{I_C} \left(1 + \frac{R_b}{R_e}\right)$$

Rozborem této rovnice lze stanovit základní pravidla pro návrh stabilizovaného zapojení tranzistoru:

- teplotní změny lze značně potlačit dostatečně velkým napětím na odporu R_E ,
- poměr odporů $\frac{R_b}{R_e}$ volit pokud možno co nejmenší,
- menší tepelné změny se projevují u tranzistorů s větším proudovým zesilovacím činitelem,
- velikost teplotních změn závisí na volbě polohy klidového pracovního bodu, a to z hlediska velikosti klidového kolektorového proudu,
- u germaniových tranzistorů převládá vliv teplotní změny zbytkového proudu; lze jej zmenšit vhodným poměrem $\frac{R_b}{R_e}$,
- u křemíkových tranzistorů má zbytkový proud zanedbatelný vliv na změnu kolektorového proudu až do teploty přechodu asi 100 °C.

Pro stabilizované zapojení tranzistoru podle obr. 3, které bylo postupně řešeno pro třikrát 10% povolené změny kolektorového proudu v závislosti na ΔU_{BE} , $\Delta \alpha_E$, ΔI_{CBO} , jsou dosu známy číselné výsledky:

$$U_{BE} = 150 \text{ mV}, \quad I_E R_E = 2,12 \text{ V}, \quad \frac{R_b}{R_e} = 5,65 \quad I_C = 6,5 \text{ mA}$$

Na základě těchto hodnot se vypočítá odpor R_E :

$$R_E = \frac{R_E I_E}{I_E} = \text{přibližně} \frac{R_E I_E}{I_C} = \frac{2,12}{6,5 \cdot 0,001} = 326 \Omega$$

Z poměru $\frac{R_b}{R_e}$ vychází

$$R_B = 5,65R_E = 5,65 * 326 = 1\ 850\ \Omega.$$

Proud báze lze odvodit ze vztahu

$$\alpha_E = \frac{I_C}{I_B}$$

Pro nejnepříznivější případ, tj. $\alpha_E = 50$, $I_C = 6,5\ \text{mA}$, vychází

$$I_B = \frac{6,5 * 0,001}{50} = 0,13 * 10^{-3}\ \text{A} = 130\ \mu\text{A}$$

Pro vstupní obvod tranzistoru platí rovnice

$$U_{01} = R_B I_B + U_{BE} + R_E (I_C + I_B) = 0,24 + 0,15 + 2,15$$

Zvolíme $U_{01} = 2,5\ \text{V}$.

Napětíovým poměrům v kolektorovém obvodu odpovídá rovnice

$$U_{02} = R_C I_C + U_{CE} + R_E (I_C + I_B)$$

Ze soustavy výstupních charakteristik (obr. 1) se přečte pro $I_C = 6,5\ \text{mA}$, $I_B = 130\ \mu\text{A}$, napětí $U_{CE} = 5\ \text{V}$. V závislosti na těchto hodnotách zvolíme napětí zdroje $U_{02} = 12\ \text{V}$.

Problém tepelné stabilizace klidového bodu tranzistoru může být řešen i mnoha jinými způsoby, které se od sebe liší volbou výchozích veličin, postupem výpočtu, mírou zjednodušení odvozených vztahů apod. Tím vycházejí různé tvary výsledných vzorců i odlišné závislosti na použitých vzorcích. Uvedený způsob ukazuje pouze jeden z možných přístupů k řešení tepelné stabilizace tranzistoru.

Zdroj: *Kurz radiotechniky – Jaroslav Dvořáček a kolektiv, SNTL, 1975*

