

Základy elektroniky

kap.4

Linus Michaeli

1

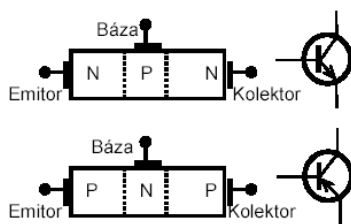
4 Bipolárny tranzistor

Emitor je bohato dotovaná časť určená na emitovanie elektrónov

Báza je stredne dotovaná úzka vrstva, určená na modulovanie pohybu elektrónov.

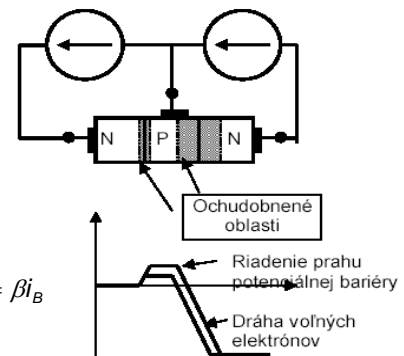
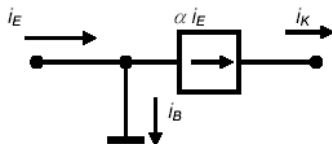
Kolektor je slabo dotovaná veľká vrstva určená na zachytávanie elektrónov .

Zapojenie dvoch diód PN proti sebe s veľmi úzkou spoločnou elektródou v strede



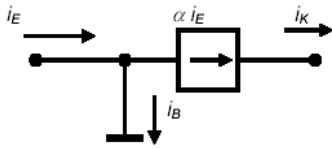
NPN tranzistor injektuje elektróny – pohyblivejšie
PNP diery – pomalšie
Inak všetky mechanizmy sú „inverzné“.

Prúd bázy: $i_B = i_E - i_C = (1 - \alpha) i_E$ úpravou $i_C = \alpha i_E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_B = \beta i_B$

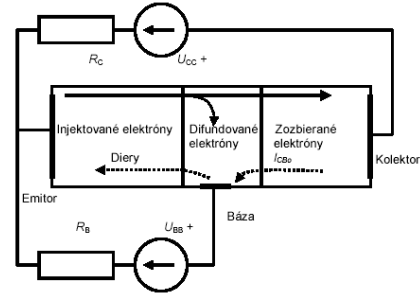


2

4.1 Modely bipolárneho tranzistora

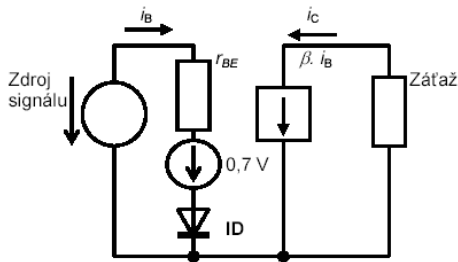


- Injektované Elektróny cez priepustne polarizovaný prechod emitor- báza a veľká časť strhnutá na kolektor.
- Prúd minoritných dier cez prechod báza – emitor - znižuje tak efektívnosť tranzistora.
- Zvyškový prúd-saturovaný prúd opačne polarizovaného prechodu kolektor – báza

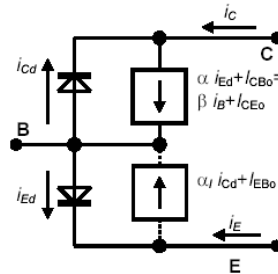


Po upresnení po častiach lineárny

Ebers Moll-ov model – už aj zvyškové prúdy exponenciálny priebeh VA charakteristiky



Presnejšie. Prúd zosilnenie SE:



$$i_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CB0} \quad \text{kde} \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{a} \quad \beta + 1 = \frac{1}{1-\alpha}$$

Presnejšie
Prúd zosilnenie SB:

$$i_E = i_B + i_C$$

$$i_C = \alpha i_E + I_{CBO}$$

kde $\alpha = \frac{\partial i_C}{\partial i_E}$

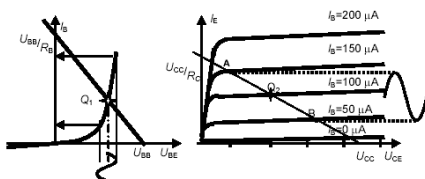
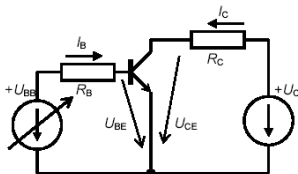
4.2 Bipolárny tranzistor

Diferenciálny odpor medzi bázou a emitorom:

$$r_{BE} = \frac{1}{\partial i_B / \partial U_{BE}} = \frac{1}{I_{BE0} e^{n \frac{U_{BE}}{U_T}} \frac{1}{U_T}} \cong \frac{U_T}{i_B}$$

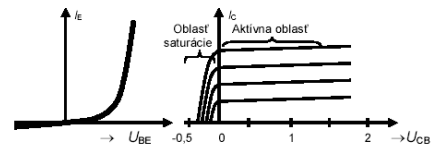
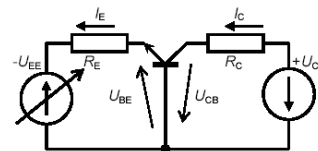
Charakteristiky bipolárneho tranzistora SE

$$U_{BC} = U_{BE} - U_{CE} = U_{BE} - U_{CC} + R_C I_C = U_{BE} - U_{CC} + R_C \beta I_B$$



Charakteristiky bipolárneho tranzistora SB

$$U_{CB} = U_{CC} - I_C R_C = U_{CC} - \alpha I_E R_C$$



$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \left| \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst}}$$

Určenie pracovného bodu SE
.OP analýza

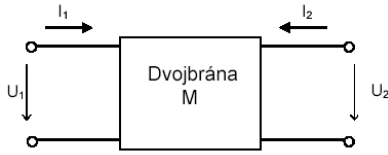
$$\text{vstup} \begin{cases} I_B = f(U_{BE}) \\ U_{BB} - R_B I_B = U_{BE} \end{cases}; \quad \text{výstup} \begin{cases} I_C = F(U_{CE}, I_B) \\ U_{CC} - R_C I_C = U_{CE} \end{cases}$$

4.3 Modely tranzistora ako zosilňovača malých signálov

Opis chovania v okolí pracovného bodu
 .AC analýza

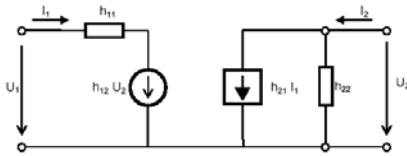
$$y(x_0 + \Delta x) = y(x_0) + \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x_0} \cdot \Delta x \Rightarrow \Delta x = U_1 \cos(\omega t)$$

Pre prírastkové veličiny, diferenciály -
 – amplitúdy har.signálu



$$\left. \begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{N} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{Z}$$

h_{11} [Ω] vstupný diferenciálny odpor tranzistora
 h_{12} [bez rozmeru] spätnoväzobný napätový prenosový činiteľ tranzistora
 h_{21} [bez rozmeru] dopredný prúdový zosilňovací činiteľ tranzistora
 h_{22} [S] výstupná diferenciálna vodivosť tranzistora



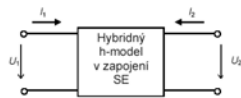
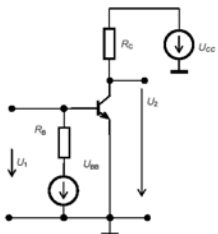
$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{(h_{21} + 1)I_b r_{BE}}{I_b} = (h_{21} + 1) \frac{nU_T}{I_{EQ}} \approx h_{21} \frac{nU_T}{I_{CQ}}$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} = \beta; \quad h_{22} \approx \text{male} \quad h_{12} \approx \text{male} \quad \text{pre NF tranz.}$$

Transformácia hybridnej matice na impedančnú maticu

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + \frac{(h_{21}I_1 + I_2)h_{12}}{h_{22}} \\ U_2 &= \frac{(h_{21}I_1 + I_2)}{h_{22}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{U} = \mathbf{Z} \mathbf{I}$$

4.3 Hybridný model pre rôzne usporiadania tranzistora



$$(SE) \quad \begin{aligned} U_{be} &= h_{11e}I_b + h_{12e}U_{ce} \\ I_c &= h_{21e}I_b + h_{22e}U_{ce} \end{aligned}$$

$$(SB) \quad \begin{aligned} U_{eb} &= h_{11b}I_e + h_{12b}U_{cb} \\ I_c &= h_{21b}I_e + h_{22b}U_{cb} \end{aligned}$$

Z I.a II.Kirchofovho zákona

$$I_e + I_c + I_b = 0 \quad \text{I.KZ}$$

$$U_{ce} = U_{cb} + U_{be} \quad \text{II.KZ}$$

$$U_{be} = -U_{eb}$$

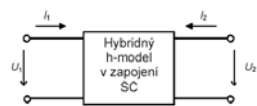
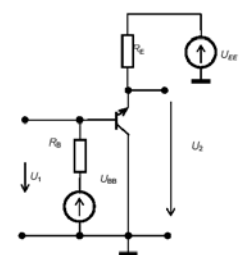
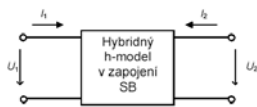
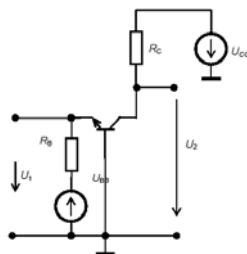
Dosadením a úpravou sústavy SE do tvaru SB

$$h_{11e} = \frac{h_{11b}}{1 + h_{21b}} \quad h_{12e} = \frac{h_{11b}h_{22b} - h_{12b}(1 + h_{21b})}{1 + h_{21b}}$$

$$h_{21e} = \frac{-h_{21b}}{1 + h_{21b}} \quad h_{22e} = \frac{h_{22b}}{1 + h_{21b}}$$

Pre namerané parametre SB po prepočte na SE

$$\left. \begin{aligned} h_{11b} &= 34 \Omega & h_{12b} &= 3,9 \cdot 10^{-4} \\ h_{21b} &= -0,997 & h_{22b} &= 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ S} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} h_{11e} &= 11,4 \text{ k}\Omega & h_{12e} &= 1,13 \cdot 10^{-4} \\ h_{21e} &= 332 & h_{22e} &= 14,7 \cdot 10^{-6} \text{ S} \end{aligned}$$



4.4 Aplikácie bip.transz. v jednostupňových zapojeniach

1. Prekreslenie zosilňovacieho obvodu zohľadňujúce jeho striedavé chovanie.

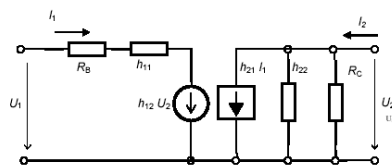
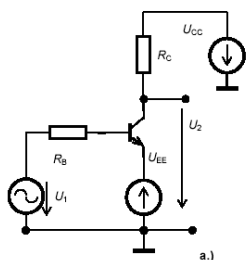
- Všetky pasívne prvky sú nahradené ich ST ekvivalentami. Väzobné a blokovacie kondenzátory sú nahradené skratom. Oddelovacie indukčnosti nekonečne veľkou impedanciou – rozpojením. Odpory nemedia svoju hodnotu.
- Reaktančné prvky (indukčnosti, väzobné indukčnosti a kondenzátory) majú svoje chovanie opísané komplexnou impedanciou. Ak hodnoty admitancií a reaktancií týchto prvkov sú nenulové pri stredných hodnotách frekvencií je ich úlohou frekvenčne upraviť spracovávaný signál.
- Nezávisle napájacie napäťové zdroje sú nahradené skratom, a nezávisle prúdové zdroje predstavujú nekonečnú impedanciu. Takto sa totiž javia tieto prvky spracovávanému ST signálu.
- Závislé zdroje prúdu a napätia zostávajú bezo zmeny lebo vyjadrujú vnútorné funkčné závislosti pôsobiace medzi vetvami v obvode. Už v Thevenínovej a Nortonovej teoréme sa sdôrazňuje možnosť náhrady napäťových a prúdových zdrojov skratom len pre nezávislé zdroje.
- Pasívne poovodičové prvky – diódy rôzneho typu sú nahradené ich diferenciálnym odporom.

2. Tranzistor je nahradený jeho štvorpólovým modelom. V ďalšom bude využitý hybridný h-model. Pre vysokofrekvenčné zosilňovače sa uprednostňuje model využívajúci rozptylové parametre. Hodnoty koeficientov matíc linearizovaných modelov sú určené pre známe hodnoty prúdov a napätí pracovného bodu.

3. Posledným krokom je výpočet želaných výsledných parametrov pomocou ST analýzy lineárnej ST schémy. V programe SPICE je to predstavované rutinou .AC .

7

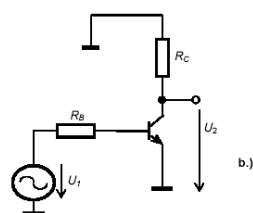
4.4 Zapojenie SE



$$U_2 = -(h_{21} I_b) \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right)$$

$$I_b = \frac{U_1}{R_B + h_{11}}$$

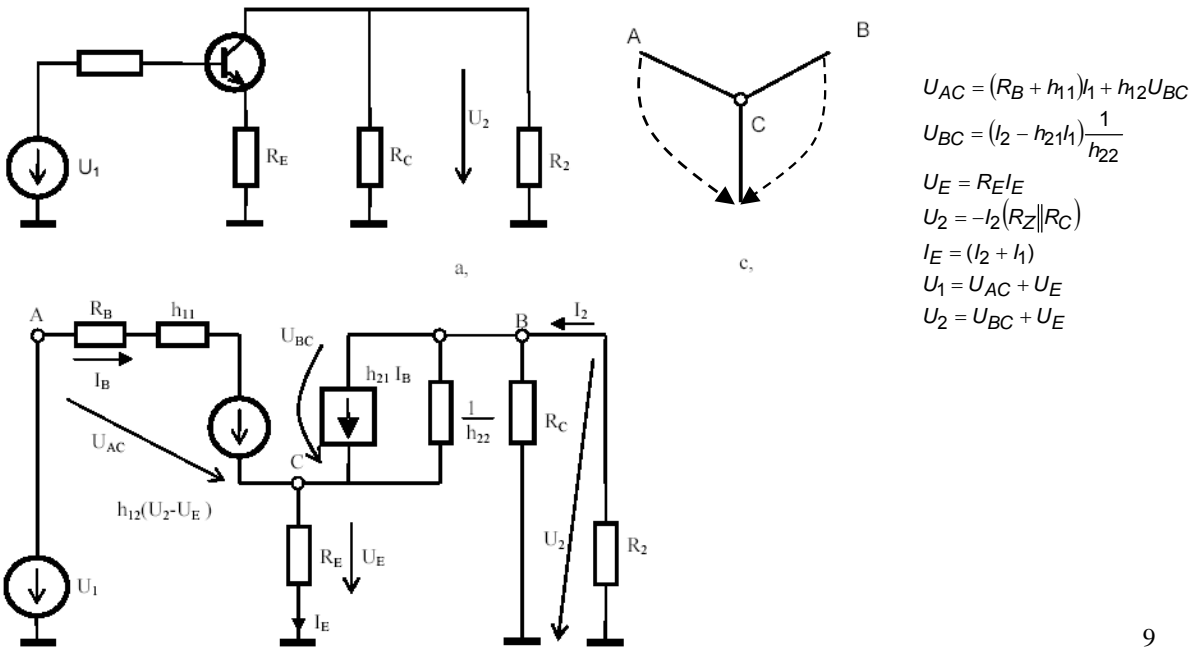
$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = - \frac{h_{21}}{R_B + h_{11}} \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right)$$



8

4.4 Zapojenie SE

1. podsústavou každá vetva grafu Ohmovým zákonom – štyri rovnice sústavy.
2. podsústavou je sústava rovníc I.KZ. Jeden uzol stromu grafu.
3. podsústava opisuje vlastnosti obvodu II KZ.

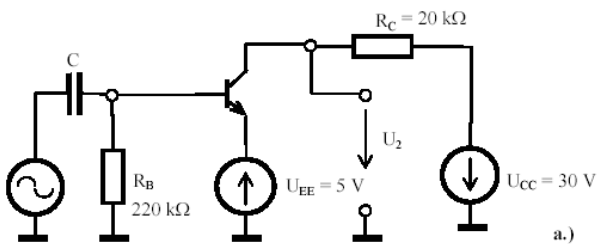


9

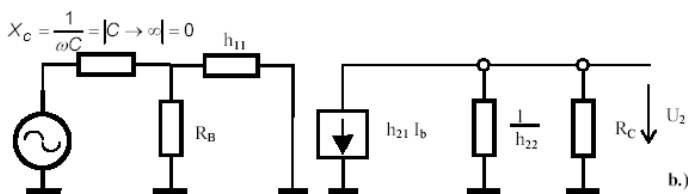
4.4 Zapojenie SE a väzobným kondenzátorom

$$U_2 = -h_{21}I_b \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right)$$

$$I_b = \frac{U_1}{h_{11}}$$



$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right)$$

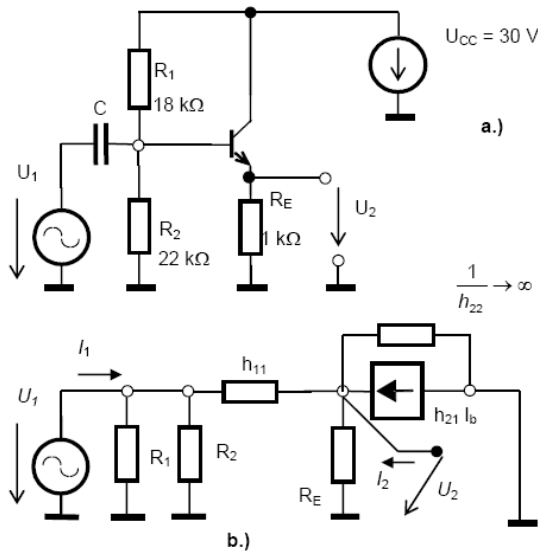


$$\left| \frac{U_{h_{11}}}{U_1} \right| = \frac{h_{11}}{\sqrt{\left(\frac{-j}{\omega_D C_C} \right)^2 + h_{11}^2}} = 0,707 \Rightarrow \frac{1}{\omega_D C_C} = h_{11}$$

odtiaľ $\omega_D = \frac{1}{C_C h_{11}}$

10

4.4 Zapojenie SC – Emitorový sledovač



$$U_b = I_b \cdot h_{11} + (h_{21} + 1) I_b \cdot R_E = [h_{11} + (h_{21} + 1) R_E] I_b$$

Vstupný odpor

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b} = h_{11} + (h_{21} + 1) R_E = 101,6 \text{ k}\Omega$$

Výstupný odpor-pomer nap naprázdno, prúd nakrátko

$$U_{20} = R_E I_b (1 + h_{21}) \Rightarrow U_{20} = \frac{U_1 R_E (1 + h_{21})}{h_{11} + R_E (1 + h_{21})}$$

$$I_b = \frac{U_1 - U_{20}}{h_{11}}$$

$$I_{2k} = \frac{U_1}{h_{11}} (1 + h_{21})$$

Výstupný odpor

$$Z_2 = \frac{R_E h_{11}}{h_{11} + R_E (1 + h_{21})} = R_E \parallel \frac{h_{11}}{(1 + h_{21})} \Big|_{\text{po dosadení}} = 5,9 \Omega$$

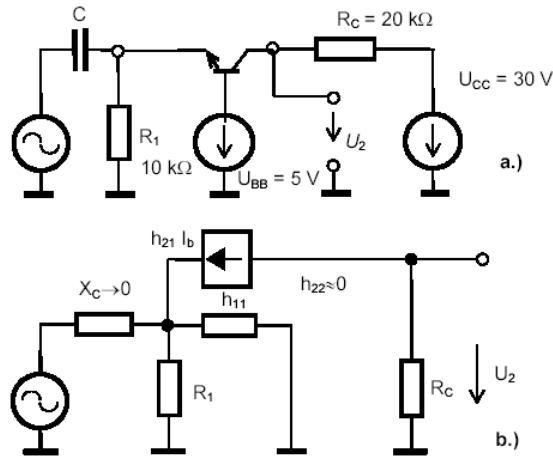
Prúdové a napäťové zosilnenie

$$I_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{11}} \right) = I_b \frac{1}{h_{11}} \Rightarrow A_i = \frac{(1 + h_{21}) R_1 \parallel R_2}{[R_1 \parallel R_2 + h_{11} + (h_{21} + 1) R_E]} \cong (1 + h_{21})$$

$$I_e = I_b (1 + h_{21})$$

$$\frac{U_1 = Z_b I_b}{U_2 = (1 + h_{21}) I_b} \Rightarrow A_u = \frac{R_E (1 + h_{21})}{Z_b} \cong 0,99$$

4.4 Zapojenie SB



Vstupný odpor

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= -I_b - h_{21} I_b + \frac{U_1}{R_1} \\ I_b &= \frac{U_1}{h_{11}} \end{aligned} \right\} Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{1}{\frac{h_{21} + 1}{h_{11}} + \frac{1}{R_1}} = h_{11} \parallel R_1 = \frac{n U_T}{I_{BQ}} \parallel R_1$$

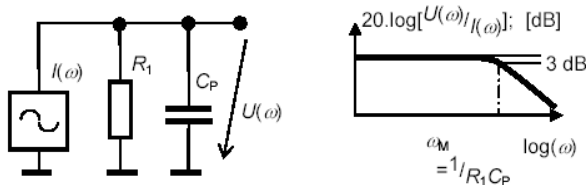
Výstupný odpor určený výhradne odporom Rc

Prúdové zosilnenie

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= -I_b - h_{21} I_b + \frac{U_1}{R_1} \\ I_2 &= h_{21} I_b; I_b = \frac{U_1}{h_{11}} \end{aligned} \right\} A_i = \frac{h_{21} I_b}{I_1} = \frac{h_{21} I_b}{I_b \left(-(h_{21} + 1) + \frac{h_{11}}{R_1} \right)}$$

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = |h_{11} \ll R_1| = \frac{h_{21}}{-(h_{21} + 1)} \approx -1$$

Frekvenčná charakteristika prenosu



Napäťové zosilnenie

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_2 R_C}{(h_{11} \parallel R_1) I_1} = \frac{A_i R_C}{(h_{11} \parallel R_1)}$$

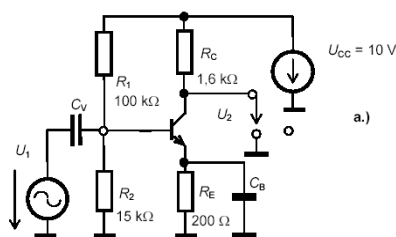
4.5 Nastavenie pracovného bodu

Výpočtové kroky:

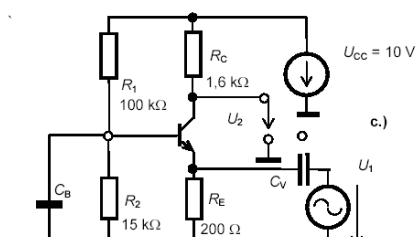
1. Výpočet prúdu v báze tranzistora z rovnice pre napätie vstupného obvodu pre odhadnutú hodnotu úbytku na priechode báza-emitor.
2. Výpočet kolektorového napätia z napäťovej slučky pre známe napájacie napätie a kolektorový prúd.
3. Posúdenie hraničných hodnôt U_{BE} pre maximálny rozkmit vstupného signálu a rôzne hodnoty prúdového zosilnenia tranzistora.
4. Výpočet diferenciálneho odporu priechodu báza-emitor r_{BE} ako určujúceho prvku pre výpočet h_{11} pri známej hodnote prúdového zosilnenia h_{21} .

$$U_{BB} = \frac{U_{CC} R_2}{R_1 + R_2} \cong 1,3 \text{ V}$$

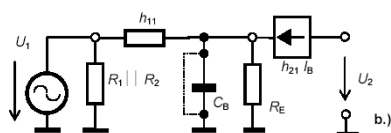
$$U_2 = R_C I_b h_{21} \quad U_1 - R_E I_b (h_{21} + 1) = h_{11} I_b \quad \Rightarrow \quad A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_C h_{21}}{R_E (h_{21} + 1) + h_{11}}$$



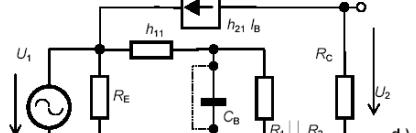
a.)



c.)



b.)



d.)

13

4.6 Dynamické vlastnosti tranzistorového stupňa

Časový priebeh na kolektore

Veľkosť nadbytočného náboja

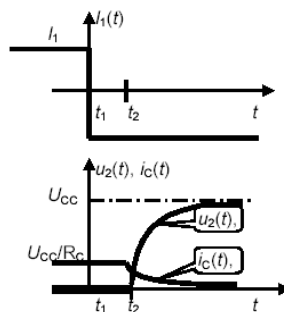
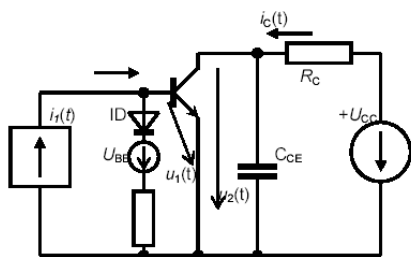
$$u_{CE}(t) = U_{CC} - R_C h_{21} i_B(t)$$

$$Q_S = \left(h_{21} i_B(t_3) - \frac{U_{CC}}{R_C} \right) \tau_R$$

Odstránenie nadbytočného náboja

$$u_2(t) = (U_{CC} - U_{CEsat}) e^{-\frac{t}{C_{CE} R_C}} + U_{CEsat}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{Q_S}{I_2}$$

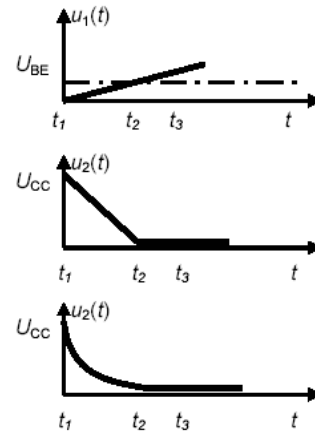
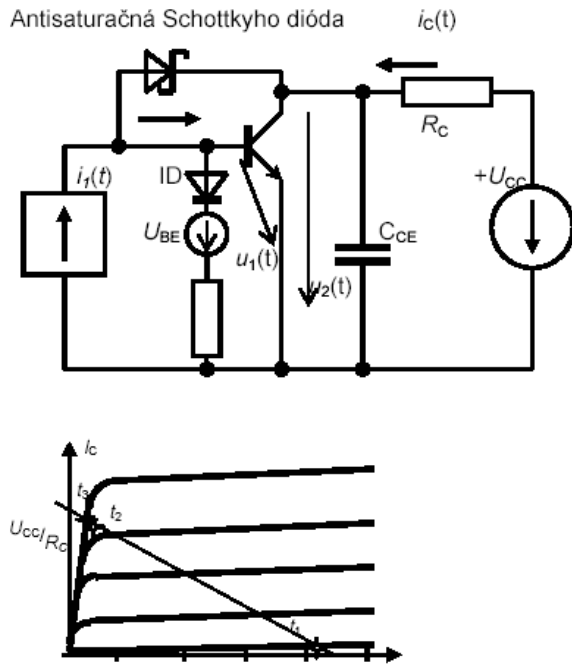


14

4.6 Dynamické vlastnosti tranzistorového stupňa

Použitie antisaturačnej diódy

Priebeh prúdu a napätia kolektora



15

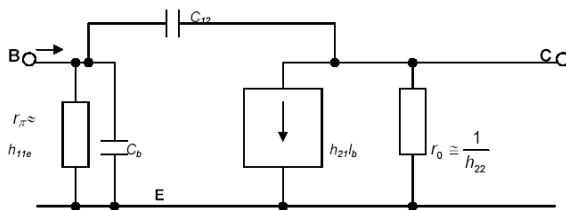
4.4 Vysokofrekvenčný model tranzistora

Kapacita báze

Kolektor báza ako kapacita varikapu (záverne polarizovaný PN priechod)

$$C_b = \frac{Q_S}{U_1} = \frac{I_C \cdot \tau_r}{U_1}$$

$$C_{CB} = C_{CB0} \left(1 - \frac{U_{BC}}{U_0} \right)^{-1/n}$$



Zmena zosilnenia vplyvom frekvencie

$$h_{21e}(f) = \frac{h_{21e0}}{1 + j \left(\frac{f}{f_\beta} \right)}; \quad h_{21b}(f) = \frac{h_{21b0}}{1 + j \left(\frac{f}{f_a} \right)}; \quad \text{kde } \beta f_\beta = \alpha \cdot f_a = f_T$$

16

4.7 Číslicové obvody na báze bipolárných tranzistorov

