

## Návrh zosilňovačov s bipolárnymi tranzistormi

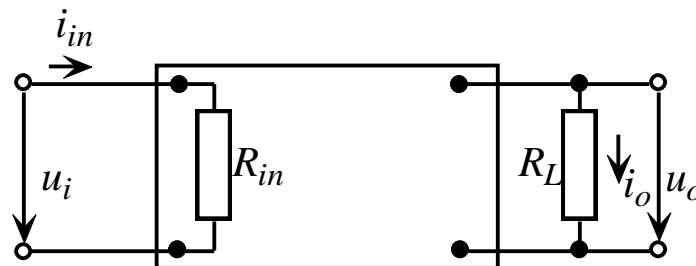
V predchádzajúcej časti sa hovorilo o nastavovaní pracovného bodu z hľadiska požadovaného rozkmitu výstupného napätia. V ďalšom bude venovaná pozornosť analýze obvodu z pohľadu malých signálov (pozn. *malý signál* - prvá prednáška) a použitia tzv. prírastkových modelov. Pri tomto bude dôraz kladený na vstupné aj výstupné impedancie a prúdové aj napäťové zosilnenia. Pozornosť bude venovaná všetkým trom základným zapojeniam, t.j. SE, SK, SB. Poukáže sa na presné aj na zjednodušené vzťahy sledovaných parametrov.

### Tranzistor ako štvorpól

#### Vzťah impedancií a ziskov

$$u_o = i_o R_L, \quad u_i = i_{in} R_{in}$$

$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{i_o}{i_{in}} \frac{R_L}{R_{in}}, \quad A_u = \frac{u_o}{u_i}, \quad A_i = \frac{i_o}{i_{in}} \Rightarrow A_u = \frac{A_i R_L}{R_{in}}$$



#### Hybridné parametre

$$u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2$$

$$u_1 = h_i i_1 + h_r u_2$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o u_2$$

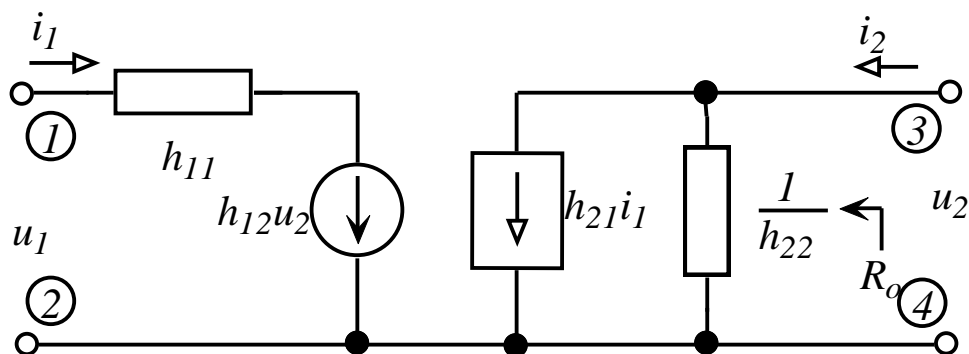
$$h_{11} = h_i = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{-vstupná impedancia}$$

$$h_{12} = h_r = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{-spätný napäťový prenos}$$

$$h_{21} = h_f = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{-prúdový zosilňovací činiteľ}$$

$$h_{22} = h_o = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{-výstupná admitancia}$$

BC 108	Si, NPN
$U_{CE} = 5V$	$I_C = 2mA$
$f = 1kHz$	$P_{max} = 300mW$
$h_{11e}$	5,5. $k\Omega$
$h_{12e}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
$h_{21e}$	370
$h_{22e}$	$30\mu S$

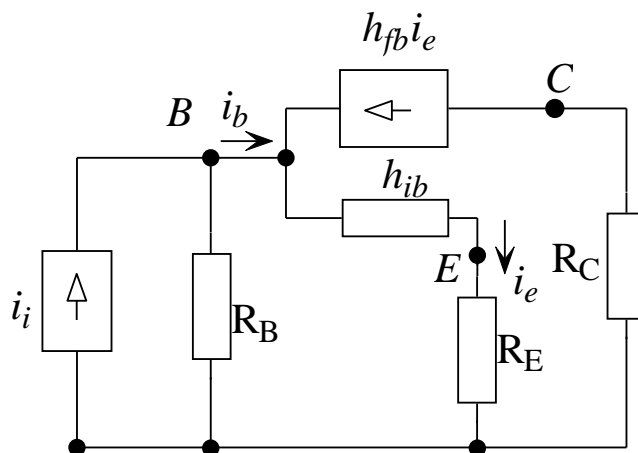
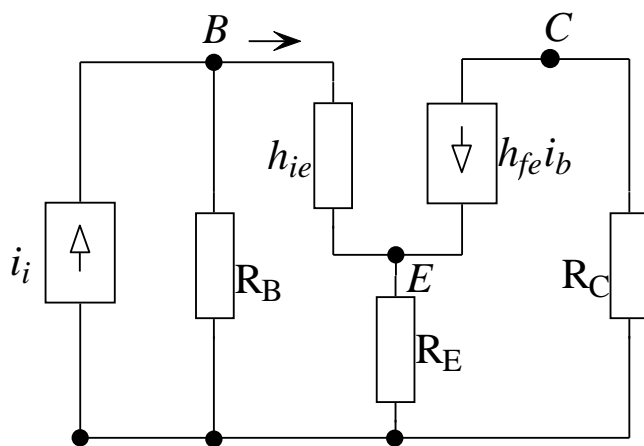
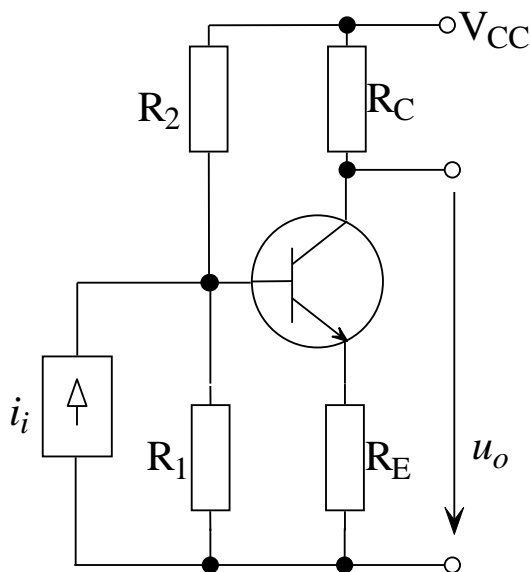
**Náhradný obvod pre  $h$  parametre**

$h$  – parametre sú závislé od konfigurácie zapojenia (SE, SB, SK) pri ich meraní ( $h_e$ ,  $h_b$ ,  $h_c$  napr.  $h_{ie}$ )

$$h_{ie} = (1 + \beta)h_{ib} \approx \beta h_{ib} = h_{fe}h_{ib} = h_{ic}$$

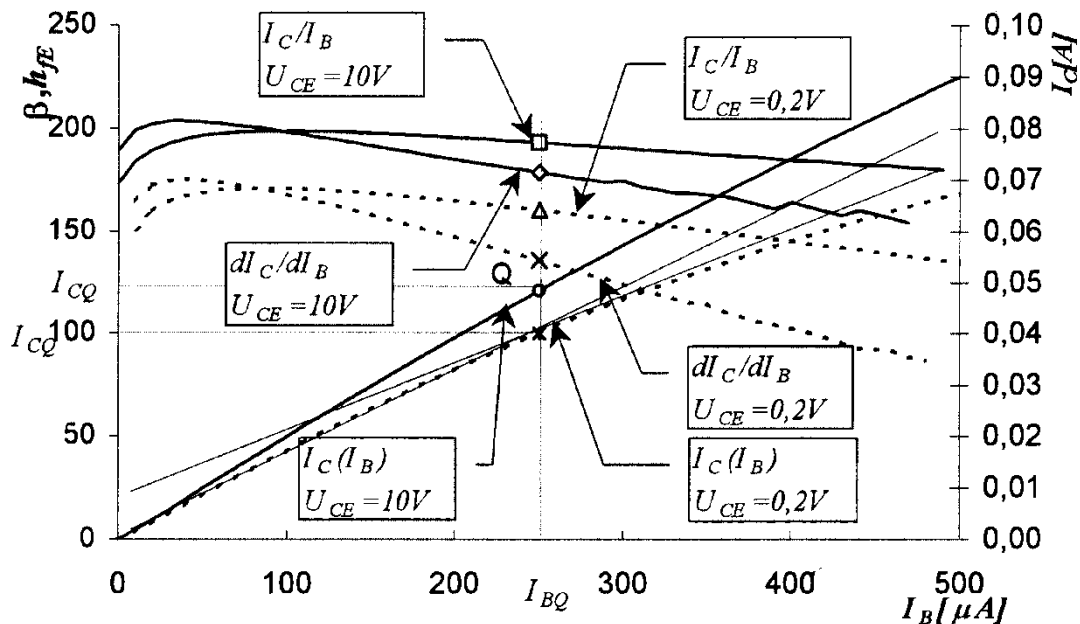
Zapojenia tranzistorového obvodu SE s odlišne nameranými  $h$  parametrami. Po analýze nameraných hodnôt  $h$  parametrov je pri praktických výpočtoch možno niektoré zanedbať, čo zjednoduší výpočet. Napr. z predchádzajúcej tabuľky je možné považovať  $h_r = h_o = 0$

Zjednodušenia:  $h_r = h_o = 0$



Pre malé zmeny prúdu  $\beta = h_{fe} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \bigg|_{u_{CE} = \text{konšt.}}$

- $h_{fe}$  je funkciou prac. bodu (v plochej oblasti  $i_C(u_{CE})$  sú iba malé zmeny  $h_{fe}$  avšak v obl. saturácie a orezávania sa mení výraznejšie (klesá)). Všetky parametre sú však aj funkciou frekvencie.



$$i_b = I_0 \left[ \exp\left(\frac{u_{be}}{U_T}\right) - 1 \right] \Rightarrow \frac{di_B}{du_{BE}} = \frac{I_0}{U_T} \exp\left(\frac{u_{be}}{U_T}\right) \Rightarrow \frac{di_B}{du_{BE}} = \frac{i_B}{U_T}$$

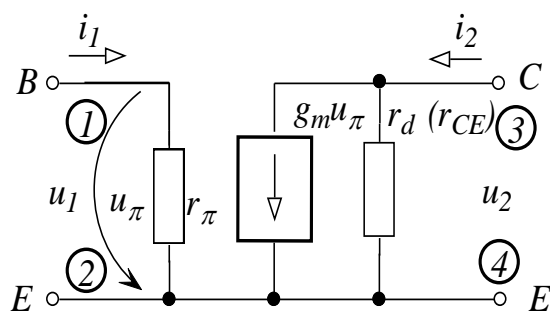
Odhad dôležitých  $h$  parametrov:

$$h_{ie} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1} \bigg|_{u_2=0} = \frac{du_{BE}}{di_B} = \frac{U_T}{I_{BQ}}$$

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{\beta} \Rightarrow h_{ib} = \frac{U_T}{\beta I_{BQ}} = \frac{U_T}{I_{CQ}} = \frac{0,026}{I_{CQ}}$$

### $\pi$ - model

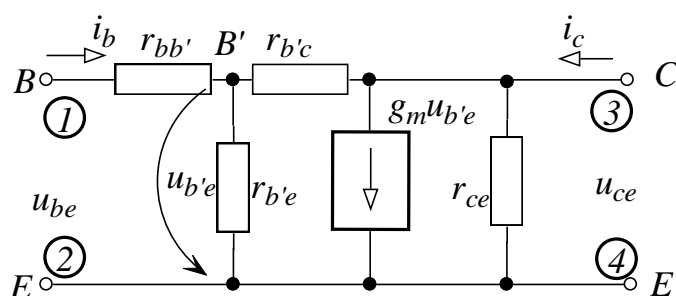
Iným často používaným modelom bipolárnych tranzistorov, ktorý sa používa hlavne pri analýze tranzistorových obvodov v oblasti vysokých frekvencií je  **$\pi$  model**. Model pri nízkych frekvenciách je podobný modelu pre  $h$  parametre. Pre vysoké frekvencie sú modely zložitejšie. Hlavný rozdiel, že prúdový zdroj riadený prúdom v  $h$  modeli je nahradený prúdovým zdrojom riadeným napätím.



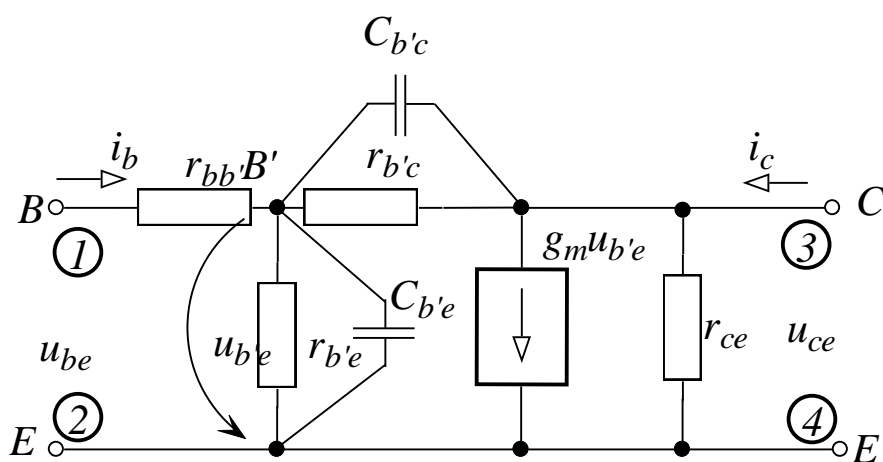
Vzťah medzi  $\pi$  a  $h$  parametrami:

$$g_m = \frac{1}{h_{ib}}, \quad r_\pi = h_{ie}, \quad r_{CE} = \frac{1}{h_o}$$

Presnejší model

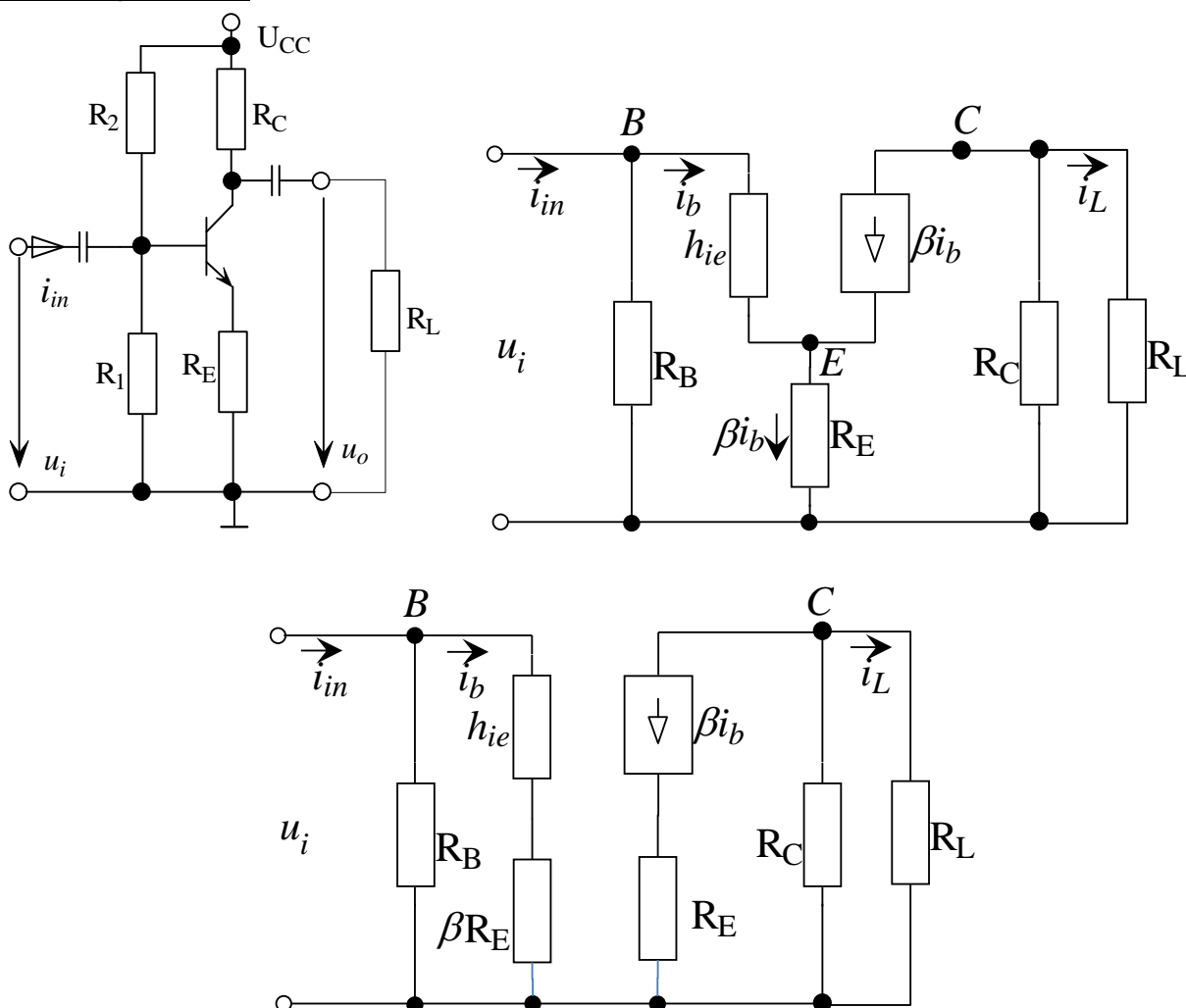


Model pre vysoké frekvencie



## Zosilňovač so spoločným emitorom - parametre

### Vstupný odpor



V náhradnom obvode sú z celkového modelu vynechané  $h_{12}$  a  $h_{22}$  lebo uvažujeme, že sú zanedbateľne malé. Prúd  $i_b$  je oproti  $i_c$  zanedbateľne malý ( $\beta \gg 1$ ) preto aj  $i_e = \beta \cdot i_b$  a nie  $(\beta + 1) \cdot i_b$ . Obvod je tak možno rozdeliť na dva obvody s tým, že ak cez odbor  $R_E$  v skutočnosti preteká prúd  $i_e$  a vytvorí na ňom úbytok napätia  $i_e R_E$ , potom, aby v rozdelenom obvode vznikol rovnaký úbytok napätia pretekajúcim prúdom  $i_b$ , náhradný odpor v bázeovej časti rozdeleného obvodu musí mať hodnotu  $\beta R_E$ .

$$R_{in} = \frac{u_i}{i_{in}} = R_B \parallel (h_{ie} + \beta R_E) = \frac{R_B (h_{ie} + \beta R_E)}{R_B + h_{ie} + \beta R_E}$$

Alebo ak by sa namiesto  $h_{ie}$  sa použilo  $h_{ib}$  (podľa toho, ktoré sú známe)

$$R_{in} = \frac{R_B (h_{ib} + R_E)}{R_B / \beta + h_{ib} + R_E} \quad \text{- relatívne presný výraz (dlhý tvar)}$$

Ak je  $R_B \ll \beta R_E$  vzťah pre  $R_{in}$  sa dá zjednodušiť

$$R_{in} \approx \frac{R_B(h_{ib} + R_E)}{h_{ib} + R_E} = R_B - \text{skrátенý tvar zvlášť ak je splnená podmienka } R_B \leq 0,1\beta R_E$$

### Napät'ové zosilnenie

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_L R_L}{u_i}$$

$i_L = \frac{-R_C \beta i_b}{R_L + R_C}$  - Prúdový delič – (mínus) znamienko vyplýva zo smeru prúdu prúdového zdroja a smeru prúdu, pretekajúceho odporom  $R_L$

$$A_u = \frac{i_L R_L}{u_i} = \frac{\beta R_L i_b}{u_i} \frac{R_C}{R_L + R_C}$$

$$i_b = \frac{R_B i_{in}}{R_B + h_{ie} + \beta R_E} - \text{prúdový delič na vstupnej strane}$$

$$A_u = \frac{-\beta R_L}{u_i} \frac{R_C}{R_L + R_C} \frac{R_B i_{in}}{R_B + h_{ie} + \beta R_E}$$

Pretože  $u_i = i_{in} R_{in}$

$$A_u = \frac{-\beta R_L}{i_{in} R_{in}} \frac{R_C}{R_L + R_C} \frac{R_B i_{in}}{R_B + h_{ie} + \beta R_E} \text{ dosadením za } R_{in} \text{ a vykrátením } i_{in}$$

$$A_u = \frac{-\beta R_L R_C}{R_L + R_C} \frac{R_B}{R_B + h_{ie} + \beta R_E} \frac{R_B + h_{ie} + \beta R_E}{R_B(h_{ie} + \beta R_E)} \text{ po vykrátení a úprave } h_{ie}$$

na  $h_{ib}$

$$A_u = \frac{-\beta(R_L \parallel R_C)}{h_{ie} + \beta R_E} = \frac{-R_L \parallel R_C}{h_{ib} + R_E} \text{ ak platí } h_{ib} \ll R_E$$

$$A_u = \frac{-R_L \parallel R_C}{R_E}$$

Ak sa  $R_E$  premostí kondenzátorom, potom

$$A_u = \frac{-R_L \parallel R_C}{h_{ib}} \text{ pri aproximácii } h_{ib} = \frac{h_{ie}}{\beta} = \frac{0,026}{|I_{CQ}|}$$

$$A_u = \frac{-(R_L \parallel R_C) I_{CQ}}{0,026}$$

Predchádzajúci vzťah ukazuje, že po premostení  $R_E$  kondenzátorom je napät'ové zosilnenie zosilňovača SE závislé iba od polohy pracovného bodu a  $R_L \parallel R_C$

**Prúdové zosilnenie**

Využijeme predtým odvodený vzťah medzi  $A_u$  a  $A_i$

$$A_i = \frac{A_u R_{in}}{R_L} = - \frac{R_B (h_{ie} + \beta R_E)}{(R_B + h_{ie} + \beta R_E) R_L} \frac{\beta (R_L \parallel R_C)}{h_{ie} + \beta R_E}$$

$$= - \frac{R_B R_C}{(R_B / \beta + h_{ib} + R_E) (R_L + R_C)}$$

Opäť ak platí  $R_B \ll \beta R_E$  potom

$$A_i = - \frac{R_B R_C}{R_E (R_L + R_C)}$$

Predtým odvodené vzťahy pre SE zosilňovač, ale aj pre ďalšie dva typy sú zosumarizované v tabuľkách

**Výstupný odpor**

V náhradnom modeli pre  $h$  parametre je výstupný obvod tvorený prúdovým zdrojom, ktorý je premostený výstupným odporom  $1/h_{22}$  resp.  $1/h_o$ . Ideálny prúdový zdroj má nekonečne veľký vnútorný odpor. Keďže  $h_{22}$  sa meria pri odpojení báze (obvodu ( $i_b=0$ )), výstupný odpor tranzistora tak bude

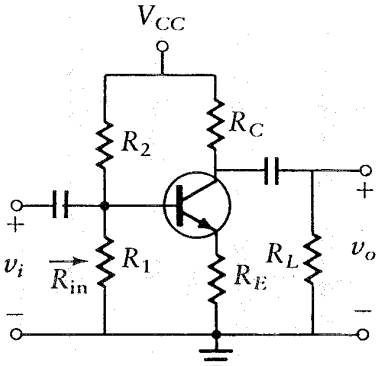
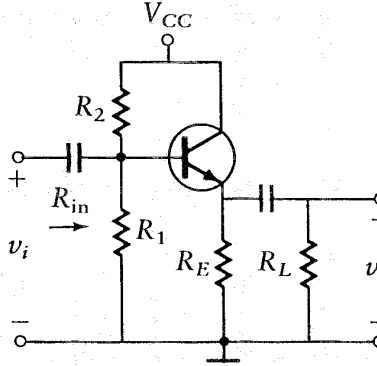
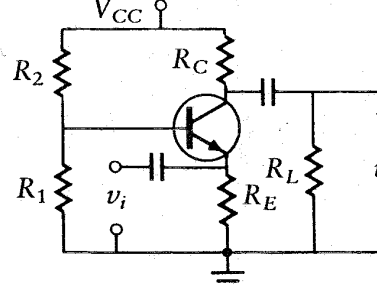
$$r_o = \frac{u_2}{i_2} = \frac{1}{h_{22}} = \frac{1}{h_{oe}}$$

Parameter  $h_{oe}$  je zvyčajne veľmi malý (viď tabuľka), potom výstupný odpor tranzistora sa uvažuje ako nekonečne veľký.

**Výstupný odpor celého SE zosilňovača  $R_o$  je tak vlastne  $R_c$ .**

Typickou hodnotou  $r_o$  je 50 kΩ.

Tabuľka vzťahov pre odlišné konfigurácie zosilňovačov

Type		Voltage Gain ( $A_v$ )	Current Gain ( $A_i$ )	Input Resistance ( $R_{in}$ )
Common emitter		Long forms: $\frac{-(R_L \parallel R_C)}{h_{ib} + R_E}$	$\frac{-R_B}{\frac{R_B}{\beta} + h_{ib} + R_E} \frac{R_C}{R_L + R_C}$	$\frac{R_B (h_{ib} + R_E)}{\frac{R_B}{\beta} + h_{ib} + R_E}$
		Short forms, if $h_{ib} \ll R_E$ and $R_B \ll \beta R_E$ : $\frac{-R_L \parallel R_C}{R_E}$	$\frac{-R_B}{R_E} \frac{R_C}{R_C + R_L}$	$R_B$
Common collector (Emitter follower)		Long forms: $\frac{R_E \parallel R_L}{h_{ib} + (R_E \parallel R_L)}$	$\frac{R_B}{\frac{R_B}{\beta} + h_{ib} + (R_E \parallel R_L)} \frac{R_E}{R_E + R_L}$	$\frac{R_B [h_{ib} + (R_E \parallel R_L)]}{\frac{R_B}{\beta} + h_{ib} + (R_E \parallel R_L)}$
		Short forms, if $h_{ib} \ll R_E \parallel R_L$ and $R_B \ll (R_E \parallel R_L)\beta$ : $1$	$\frac{R_B}{R_L}$	$R_B$
Common base		Long forms: $\frac{R_C \parallel R_L}{h_{ib} + \frac{R_B}{\beta}}$	$\frac{+R_C}{R_C + R_L} \frac{R_E}{R_E + h_{ib} + \frac{R_B}{\beta}}$	$R_E \parallel (h_{ib} + \frac{R_B}{\beta})$
		Short forms, if $h_{ib} \ll R_E$ and $R_B \ll \beta R_E$ : $\frac{R_C \parallel R_L}{h_{ib} + \frac{R_B}{\beta}}$	$\frac{R_C}{R_C + R_L}$	$h_{ib} + \frac{R_B}{\beta}$

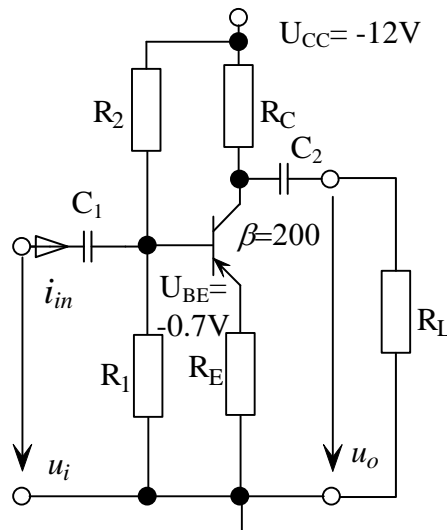


Tabuľka ekvivalentných obvodov pre odlišné konfigurácie zosilňovačov

Type	Circuit	Equivalent Circuit	Equivalent Circuit with $R_E$ Bypassed
Common emitter			
Common collector			
Common base			

**Návrh kapacitne viazaného zosilňovača so SE**

Príklad: Navrhnete SE zosilňovač podľa obrázka tak, aby  $A_u = -10$ , pričom  $\beta = 200$  a  $R_L = 1\text{k}\Omega$ . Požiadavkou je maximálny rozkmit na výstupe a použitie PNP tranzistora.



Riešenie:

1) Pre  $A_u = \frac{-R_L \parallel R_C}{R_E}$  sú dve neznáme ( $R_C$  a  $R_E$ ), preto je potrebná ďalšia rovnica alebo predpoklad.

Z hľadiska požiadavky prenosu maximálneho výkonu do záťaže by mala byť výstupná impedancia zosilňovača rovnaká ako zaťažovacia. Z tejto požiadavky potom vyplynie  $R_C = R_L = 1\text{k}\Omega$ .

2) Z  $A_u$  tak vyjde  $R_E = 50\Omega$ .

3) Je potrebné preveriť či zjednodušený tvar pre  $A_u$ , ktorý bol použitý spĺňa podmienku aby  $h_{ib}$  mohol byť oproti  $R_E$  zanedbaný. Pre odhad  $h_{ib}$  je potrebné poznať hodnotu prúdu  $I_{CQ}$ . Ten sa zistí z AC a DC zaťažovacej priamky.

$$R_{AC} = R_E \parallel R_C \parallel R_L = 550\Omega.$$

$$R_{DC} = R_E \parallel R_C = 1050\Omega.$$

Vzťah pre  $I_{CQ}$ , aby bol zabezpečený maximálny rozkmit je:

$$I_{CQ} = \frac{U_{CC}}{R_{AC} + R_{DC}} = -7,5\text{mA}$$

4) Vypočíta sa  $h_{ib}$  a overí sa jeho nerovnosť voči  $R_E$

$$h_{ib} = \frac{0,026}{|I_{CQ}|} = \frac{0,026\text{V}}{7,5\text{mA}} = 3,47\Omega \text{ ale správnejšie by bolo zvoliť}$$

$$R_E = 50 - h_{ib} = 46,5\Omega.$$

Je zrejmé, že  $h_{ib} \ll R_E$  a preto pri použití zjednodušenej formy výrazu  $A_u$  sa nedopúšťame veľkej chyby. Ak by v zadaní bola požiadavka na prúdové zosilnenie alebo vstupný odpor, použili by sa tieto vzťahy pre výpočet  $R_B$

(Theveninova náhrada zdroja obvodu bázy). Tým je výstupná strana navrhnutá.

5) Pre určenie  $R_B$  sa tak použije podmienka

$$R_B = 0,1\beta R_E = 0,1 \cdot 200 \cdot 50 = 1k\Omega.$$

6) Pretože bola splnená  $R_B = 0,1\beta R_E$  predpokladáme, že na výpočet prúdového zosilnenia sa môže použiť zjednodušený tvar

$$A_i = -\frac{R_B R_C}{R_E (R_L + R_C)} = \frac{-1000 \cdot 1000}{50 \cdot (1000 + 1000)} = -10$$

Ak preveríme vhodnosť použitia zjednodušeného vzťahu pre výpočet  $A_i$ , potom presnejší výpočet by bol

$$R_B = 0,1\beta(R_E - h_{ib}) = 0,1 \cdot 200 \cdot (50 - 3,47) \approx 930 \text{ a}$$

$$A_i = -\frac{R_B R_C}{(R_B / \beta + h_{ib} + R_E)(R_L + R_C)} = -8,5$$

To naznačuje chybu väčšiu ako 10% preto neuvažujeme zjednodušený tvar ale pokračujeme s použitím dlhšieho výrazu.

$$7) U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = -12 - (1046)(-0,0075) = -4,155V$$

$$U_{BB} = I_{CQ} \left( \frac{R_B}{\beta} + R_E \right) + U_{BE}$$

$$8) = (-0,0075) \left( \frac{930}{200} + 46,5 \right) + (-0,7) = -1,08V$$

$$9) R_1 = \frac{R_B U_{CC}}{U_{CC} - U_{BB}} = \frac{930(-12)}{(-12) - (-1,08)} = 1,02k\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_B U_{CC}}{U_{BB}} = \frac{930(-12)}{(-1,08)} = 10,3k\Omega$$

$$10) R_{in} = \frac{R_B (h_{ib} + R_E)}{R_B / \beta + h_{ib} + R_E} = \frac{930(50)}{930/200 + 50} = 851\Omega$$

11)  $R_O = R_C = 1k\Omega$  ak sa predpokladá, že  $r_O \gg R_C$ .

12) Maximálny rozkmit špička – špička na výstupe je potom  
 $maxRozkmit = 2|I_{CQ}| \times (R_C || R_L) = 2 \cdot 0,0075 \cdot 500 = 7,5V$

13) Výkon dodaný do záťaže a stratený na tranzistore je

$$P_L = \frac{(I_{CQ})^2 R_L}{8} = 7mW \text{ a}$$

$$P_T = I_{CQ} U_{CEQ} = 30,9mW$$

Ak by namiesto  $A_u$  boli definované buď  $R_{in}$  alebo  $A_i$ , potom by boli použité spolu s podmienkou  $R_B = 0,1\beta R_E$  pre určenie  $R_B$  a následne  $R_E$ .