

# Základy elektroniky

## kap.6

# Viactranzistorové zapojenia

Linus Michaeli

1

## 6.1 Analýza elektronických obvodov pomocou linearizovaných modelov

. Obvodové vlastnosti prvkov budú nahradené ich diferenciálnymi parametrami (linearizovanými- prírastkovými veličinami) a študované prúdy a napätia budú tvoriť diferenciálny prírastok k pracovným prúdom a napätiam. Princíp superpozície neplatí v nelineárnych sústavach

Ľubovoľná veličina  $V$  za týchto predpokladov pozostáva z jednosmernej pracovnej hodny  $V_0$  a superponovanej striedavej- prírastkovej- zložky  $\Delta V$ .

$$V = V_0 + \frac{\partial V}{\partial b_1} db_1 + \dots + \frac{\partial V}{\partial b_L} db_L$$

2

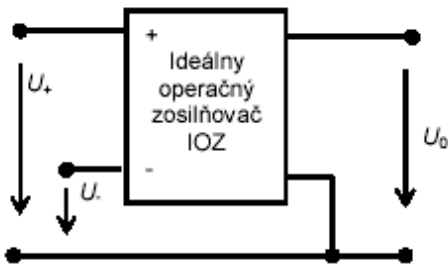
## 5 Základný diferenčný stupeň

kde pre ideálny  $A_D \rightarrow \infty$  a  $A_{CM} = 0$ .

$$U_O = A_D(U_1 - U_2) + A_{CM} \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$$CMRR_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_D}{A_{CM}} \right| \quad \text{absolutne} \quad CMRR = \left| \frac{A_D}{A_{CM}} \right|$$

- nekonečným zosilnením v diferenčnom móde. V reálnom OZ je diferenčné zosilnenie  $A_D = 10^6$ .
  - nulovým zosilnením v súčtovom móde. V reálnom OZ je zosilnenie súčtového signálu  $A_{CM} = 1-10..$ . Výstupné napätie OZ je potom určené vzťahom
  - nekonečnou vstupnou impedanciou. V reálnom OZ je vstupný odpor  $R_{IN} = 10 \text{ M}\Omega$ .
  - nulovým výstupným odporom. V reálnom OZ je výstupný odpor  $R_{OUT} = 50 \Omega$ .
- nekonečnou šírkou frekvenčného pásma spracovávaného signálu. V reálnom OZ je frekvencia prvého pólu frekvenčnej charakteristiky je cca  $f_1 = 20 \text{ Hz}$

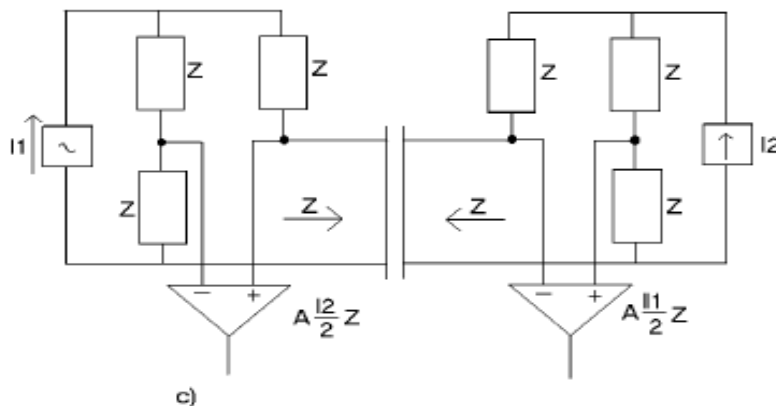
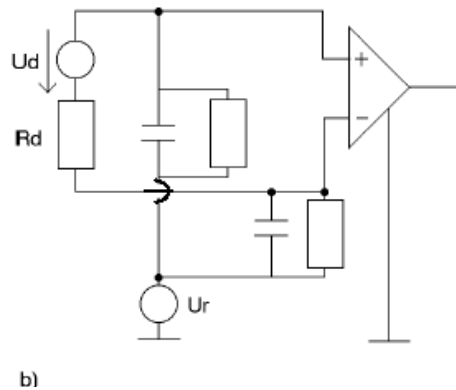
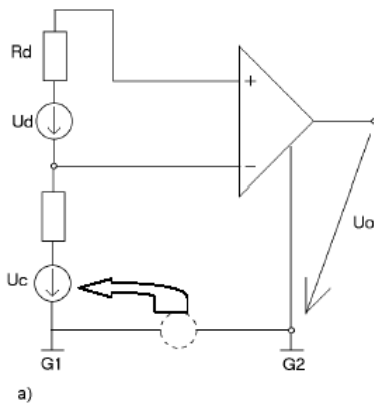


Využitie so spätnou väzbou

$$A' = \frac{A}{1 - \beta A} = \left| A \rightarrow \infty \right| = -\frac{1}{\beta}$$

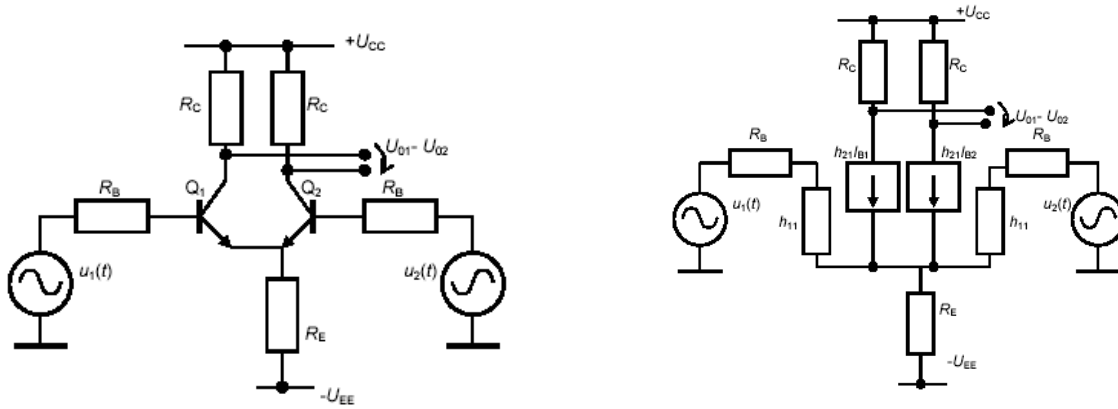
3

## 5 Využitie zosilňovača s vysokým CMRR



4

## 5 Diferenčný stupeň



Diferenčný zosilňovač a náhrada tranzistorov jednoduchým h modelom  
Výstupné napätia

$$U_{O1} = -h_{21e} I_{b1} R_C \quad \text{za predpokladu} \quad h_{21e1} = h_{21e2} = h_{21e}$$

$$U_{O2} = -h_{21e} I_{b2} R_C$$

Vstupné prúdy

$$I_{b1} = \frac{U_1 - U_e}{R_B + h_{11e1}} = \frac{U_1 - U_e}{R_B + h_{11e}}$$

$$I_{b2} = \frac{U_2 - U_e}{R_B + h_{11e2}} = \frac{U_2 - U_e}{R_B + h_{11e}}$$

ak  $h_{11e1} = h_{11e2} = h_{11e}$

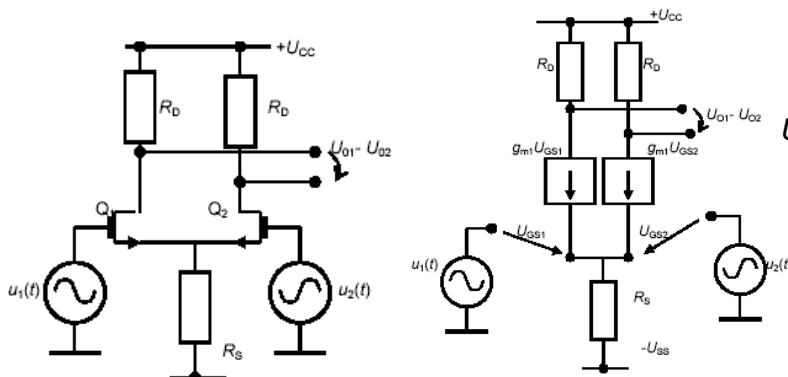
Zosilnenia

$$U_{O1} - U_{O2} = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{R_B + h_{11e}} (U_1 - U_2) = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{R_B + h_{11e}} U_D \Rightarrow A_D = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{R_B + h_{11e}}$$

$$U_{O2} = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{R_B + h_{11e}} \left( \frac{U_D}{2} + \frac{(R_B + h_{11e}) U_C}{2 \cdot R_E (1 + h_{21e})} \right) = A_D U_D + A_{CM} U_C$$

5

## 5 Základný diferenčný stupeň MOS FETmi



Vstupné odpory

$$U_D = I_b (R_B + h_{11e}) \cdot 2 \Rightarrow R_{inD} = 2(R_B + h_{11e})$$

$$R_{inC} = (R_B + h_{11e}) + 2(1 + h_{21e}) R_E$$

Výstupné napätia

$$U_0 = U_{O1} - U_{O2} = -g_m R_D U_{gs1} - (-g_m R_D U_{gs2})$$

kde  $U_{gs1} = U_1 - U_S$ ;  $U_{gs2} = U_2 - U_S$

Výstupné napätia pre nesymetrický výstup

$$U_S = g_m R_S (U_{gs1} + U_{gs2}) = g_m R_S (U_1 + U_2 - 2U_S)$$

odtiaľ 
$$U_S = \frac{g_m R_S (U_1 + U_2)}{1 + 2 \cdot g_m R_S}$$

Potlačenie súhlasového signálu v oboch prípadoch

Zosilnenie

$$A_U = \frac{U_0}{U_1 - U_2} = -g_m R_D$$

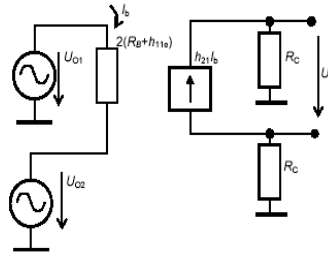
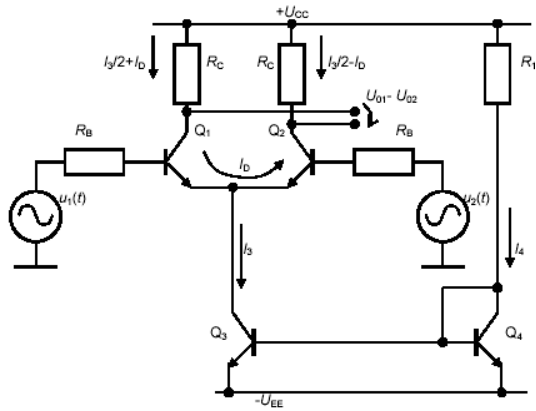
Zosilnenie

$$U_{O1} = g_m R_D \left[ \frac{U_1 - U_2}{2} + \frac{U_1 + U_2}{2(1 + 2 \cdot g_m R_S)} \right] = g_m R_D \left[ U_D + \frac{U_C}{(1 + 2 \cdot g_m R_S)} \right]$$

$$CMRR|_{bipolar} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2(1 + h_{21e}) R_E}{R_B + h_{11e}} \right]; \quad CMRR|_{unipolar} = \frac{1 + 2g_m R_S}{2}$$

6

## 5 Diferenčný zosilňovač s prúdovým zdrojom



Kľudový prúd kolektorov spôsobí kľudové napätie na kolektoroch  $U_{O1}=U_{O2}$

$$U_{O1} = U_{O2} = U_{CC} - I_C R_C = U_{CC} - \frac{R_C (U_{CC} + U_{EE} - U_{BEact})}{2 R_1} I_C R_C$$

Zosilnenia

Diferenčné

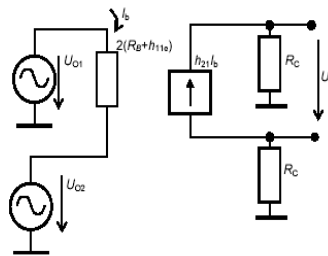
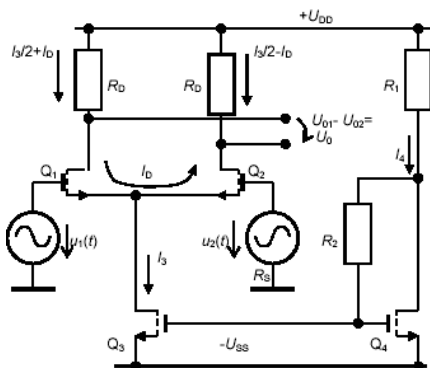
$$U_d = U_{O1} - U_{O2} = h_{21e} R_C \frac{-(U_1 - U_2)}{R_B + h_{11e}}; \quad A_D = \frac{-h_{21e} R_C}{R_B + h_{11e}}; \quad A_{CM} = 0$$

Súhlasové

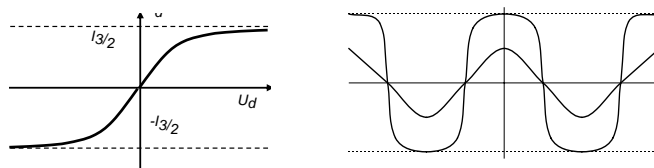
$$U_{O2} = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{R_B + h_{11e}} \left( \frac{U_D}{2} + \frac{(R_B + h_{11e}) h_{22e} U_C}{2 \cdot (1 + h_{21e})} \right) = A_D U_D + A_{CM} U_C$$

7

## 5 Dif. zosilňovač s prúdovým zdrojom MOS FET



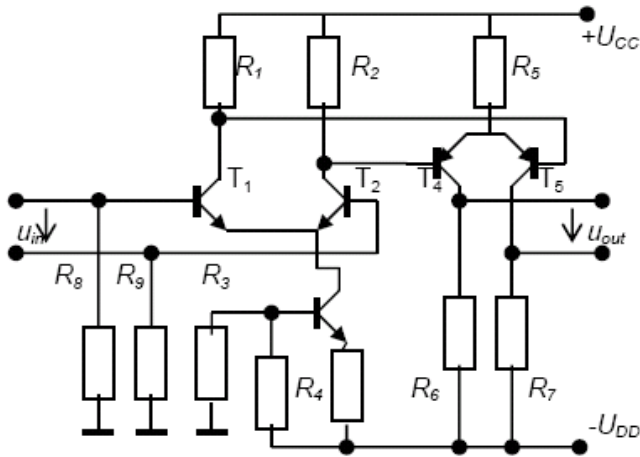
Prenosová charakteristika a skreslenie



- Nulovému vstupnému napätíu odpovedá nulové výstupné napätie.
- Prípadna kaskáda diferenčných stupňov s tranzistormi opačných vodivostí (1. diferenčný stupeň s NPN tranzistormi a 2. s PNP tranzistormi alebo N kanál kombinovaný s P kanálovým unipolárnym diferenčným stupňom).
- Skreslenie výstupného signálu obmedzením je symetrické voči počiatku.
- Vysoké potlačenie súčtového signálu.
- Symetrické napájacie napätie umožní spracovávať bipolárny vstupný signál.

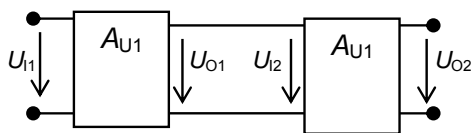
8

## 5 Kaskáda diferenčných zosilňovačov

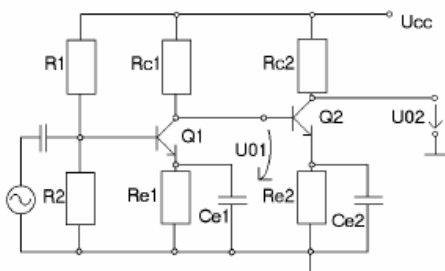


9

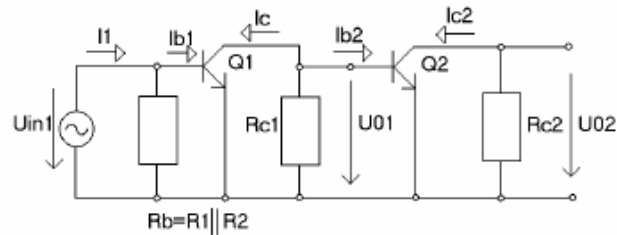
## 6.3 Viacstupňové tranzistorové obvody



$$A_u = \frac{U_{O2}}{U_{I1}} = \frac{U_{O2}}{U_{I2}} \frac{U_{O1}}{U_{I1}} = A_{u2} A_{u1}$$



Dvojstupňový zosilňovač SE-SE

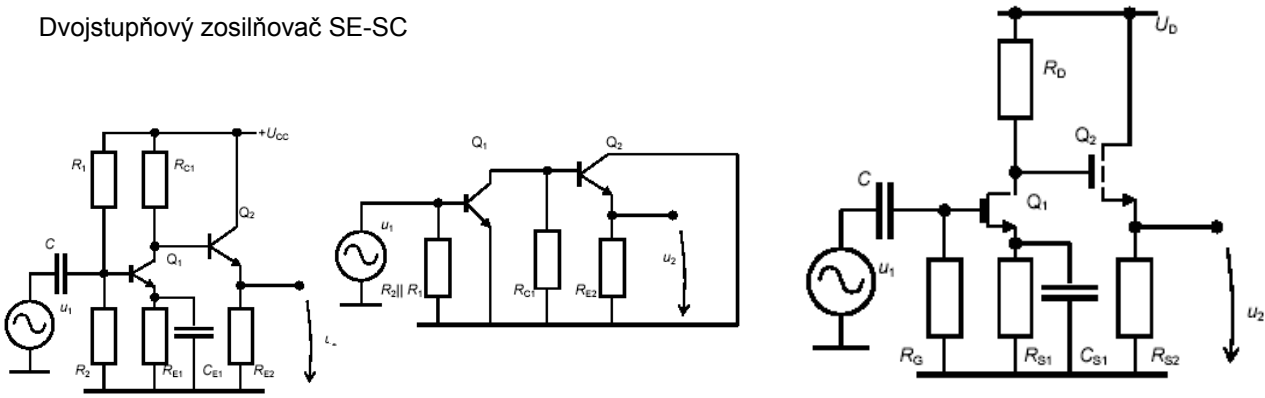


$$\left. \begin{aligned} U_{O2} &= -R_{C2} \cdot h_{21e} \cdot I_{b2} \\ I_{b2} &= \frac{R_{C1}}{R_{C1} + h_{11e}} (-I_{c1}) \\ I_{c1} &= h_{21e} I_{b1} \\ I_{b1} &= \frac{U_{in1}}{h_{11e}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_u = \frac{h_{21e}^2 R_{C1} R_{C2}}{h_{11e} (R_{C1} + h_{11e})}$$

10

## 6.3 Viacstupňové tranzistorové obvody

Dvojstupňový zosilňovač SE-SC



Zosilnenie podobne ako v predchádzajúcom prípade len zosilnenie druhého stupňa 1

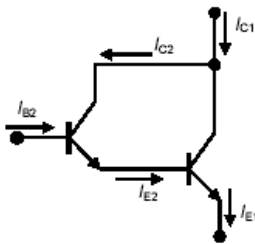
$$U_{O2} = -R_{E2} \cdot (h_{21e} + 1) \cdot I_{b2}$$

$$I_{b2} = \frac{R_{C1}}{R_{C1} + h_{11e} + (h_{21e} + 1)R_{E2}} (-I_{c1}) \Rightarrow A_U = \frac{h_{21e}^2 R_{C1} R_{E2}}{h_{11e} (R_{C1} + h_{11e} + (h_{21e} + 1)R_{E2})}$$

11

## 5 Darlingtonová dvojica

Prúdové zosilnenie



$$A_{iC} = \frac{I_{out}}{I_{b2}} = \frac{I_{C2}}{I_{b2}} + \frac{I_{C1}}{I_{b1}} \frac{I_{b1}}{I_{b2}} = h_{21e1} + (1 + h_{21e1})h_{21e2} =$$

$$= \left| \begin{matrix} h_{21e1} = h_{21e2} \\ h_{21e} > 100 \end{matrix} \right| \cong h_{21e}^2$$

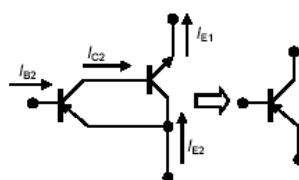
Vstupný odpor

$$R_{in} = \frac{U_{be2}}{I_{b2}} = \frac{I_{b2} h_{11e2} + I_{b2} (h_{21e2} + 1) h_{11e1}}{I_{b2}} = h_{11e2} + (h_{21e2} + 1) h_{11e1}$$

Vstupný odpor jedného tranzistora

$$h_{11e} = (h_{21e2} + 1) \frac{kT}{q \cdot I_{eq}} = \frac{kT}{q \cdot I_{bq}}$$

Výkonový PNP tranzistor realizovaný dvojicou tranzistorov

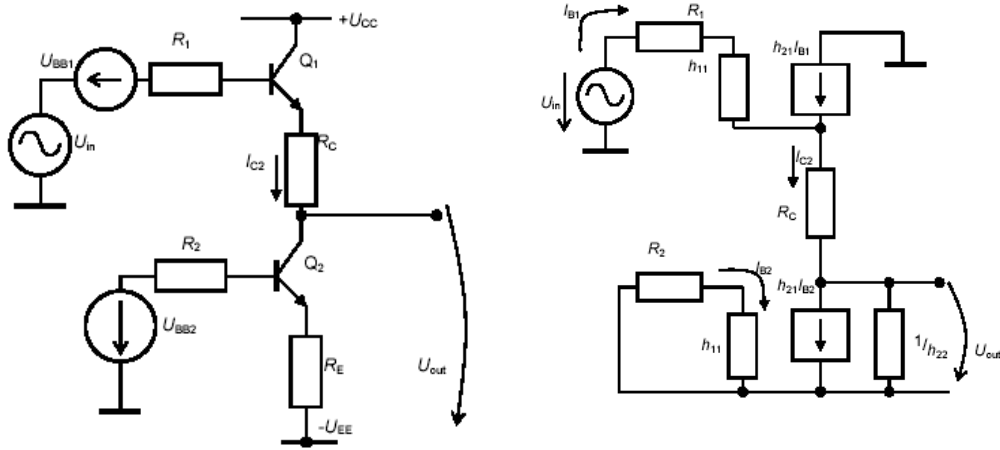


$$h_{21evysl} = \frac{I_{e1}}{I_{c2}} \frac{I_{c2}}{I_{b1}} =$$

$$= (h_{21e1} + 1) h_{21e2} \cong h_{21e1} \cdot h_{21e2}$$

12

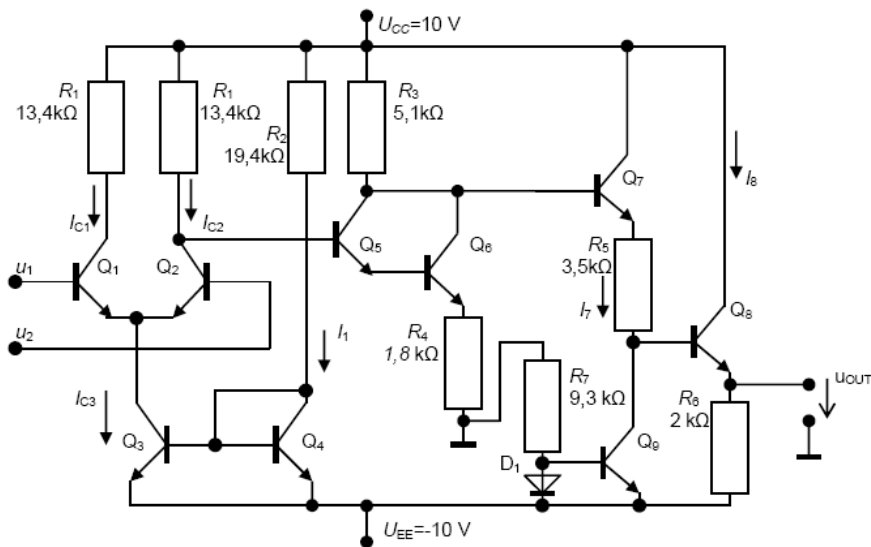
## 5 Zosilňovač posúvajúci jednosmernú úroveň



$$\left. \begin{aligned} U_{in} &= I_{B1}R_1 + I_{B1}h_{11e} + I_{C2}R_C + I_{C2} \frac{1}{h_{22b}} \\ U_{out} &= I_{C2} \frac{1}{h_{22b}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1/h_{22b}}{1/h_{22b} + [(R_1 + h_{11e})/(1 + h_{21e}) + R_C]}$$

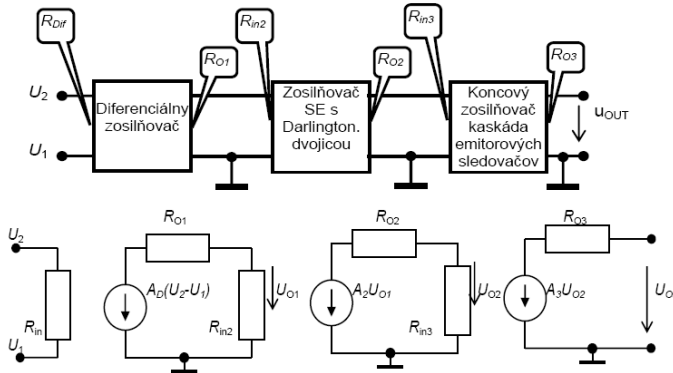
13

## 6.4 Jednoduchý operačný zosilňovač



14

# Striedavá analýza OZ



## Zosilnenie a vstupnú impedancia

•Prvý st

$$A_d = \frac{-h_{21e}R_1}{2h_{11e}} = -129$$

•Druhý st

$$A_2 = \frac{(h_{21e})^2 R_3}{R_{in2}} = -2,6$$

•Koncový st.

$$A_3 \cong 1$$

$$h_{11e} = \frac{kT}{qI_B} \Rightarrow h_{11e1} = 5,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{in} = h_{21}h_{11} \cong |h_{21} \approx 10^3| \cong 5,2 \cdot 10^6$$

$$R_{in2} = h_{11e5} + (1 + h_{21e})[h_{11e6} + (1 + h_{21e})R_4] = 19,7 \text{ M}\Omega$$

$$R_{out1} = R_1 = 13,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_{in3} = h_{11e7} + (1 + h_{21e})[R_5 + h_{11e8} + (1 + h_{21e})R_6] = 20,6 \text{ M}\Omega$$

$$R_{out2} = R_3 = 5,1 \text{ k}\Omega$$

Výsledné zosilnenie

$$A_d = \frac{U_{OUT}}{U_2 - U_1} = A_d A_2 A_3 = 335$$

15

## Prístrojový zosilňovač

1. nekonečným zosilnením v diferencnom móde ( $A = 10^6$ )

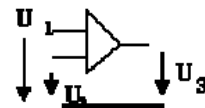
$$U_3 = A_D(U_1 - U_2) + A_{CM} \frac{U_1 + U_2}{2}$$

2. nulovým zosilnením v súčtovom móde ( $A_{CM}=10$ )

3. nekonečnou vstupnou impedanciou ( $R_{IN}=10 \text{ Mohm}$ )

4. nulovým výstupným odporom. ( $R_{OUT}=50 \text{ Ohm}$ )

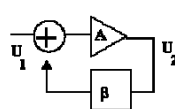
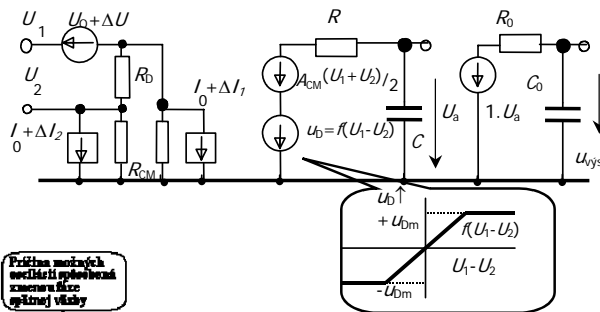
5. nekonečnou šírkou frekvenčného pásma spracovávaného signálu. (frekvencia prvého pólu  $f_1=20 \text{ Hz}$ )



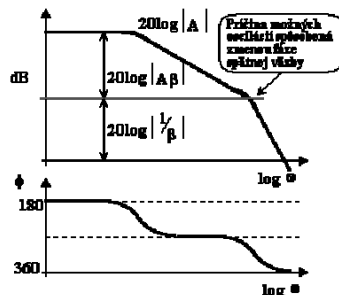
Obr. 2.1.8. Ideálny operačný zosilňovač

$$\Delta I_i = \Delta I_{oi} + \frac{\partial \Delta I_{oi}}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial \Delta I_{oi}}{\partial U_N} \Delta U_N; i = 1, 2$$

$$\Delta U = \Delta U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial U_0}{\partial U_N} \Delta U_N$$



Koef.  
 $\text{Arg } A\beta = 180 + 2,90$   
 $20 \log |A\beta| < 0$



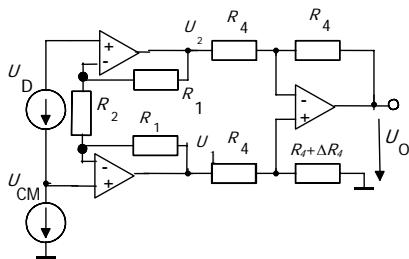
$$CMRR = 20 \log \left| \frac{A_b}{A_{CM}} \right|$$

Obr.2.1.3. Prásová charakteristika operatívneho zosilňovača.

16

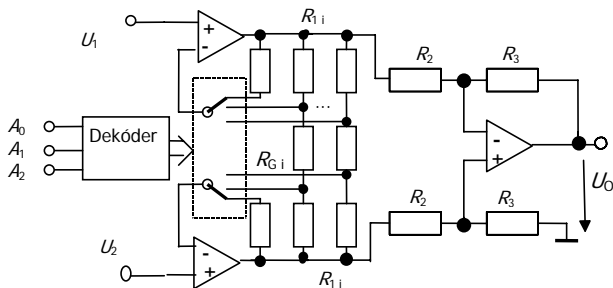


## Prístrojový a programovateľný zosilňovač



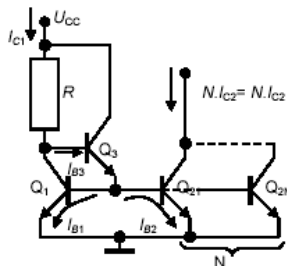
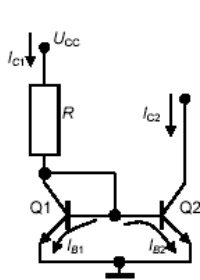
$$U_0 = U_D \left( \frac{2R_1}{R_2} + 1 \right) - \frac{\Delta R_4}{2R_4} U_{CM}$$

## Programmable gain amplifier PGA



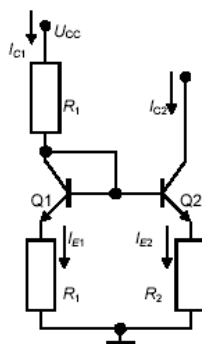
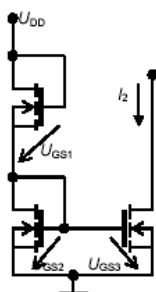
17

## Prúdové zrkadlo



$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{S01} \exp\left(\frac{U_{BE1}}{U_T}\right)}{I_{S02} \exp\left(\frac{U_{BE2}}{U_T}\right)} = \frac{S_{E1}}{S_{E2}}$$

## Widlarové zrkadlo



$$R_2 I_{C2} - R_3 I_{C1} = U_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right)$$

ak  $U_{BE} \ll R_2 I_{C2} \Rightarrow \frac{I_{C2}}{I_{C1}} = \frac{R_3}{R_2}$

18

# Prúdový zdroj ako aktívna záťaž

