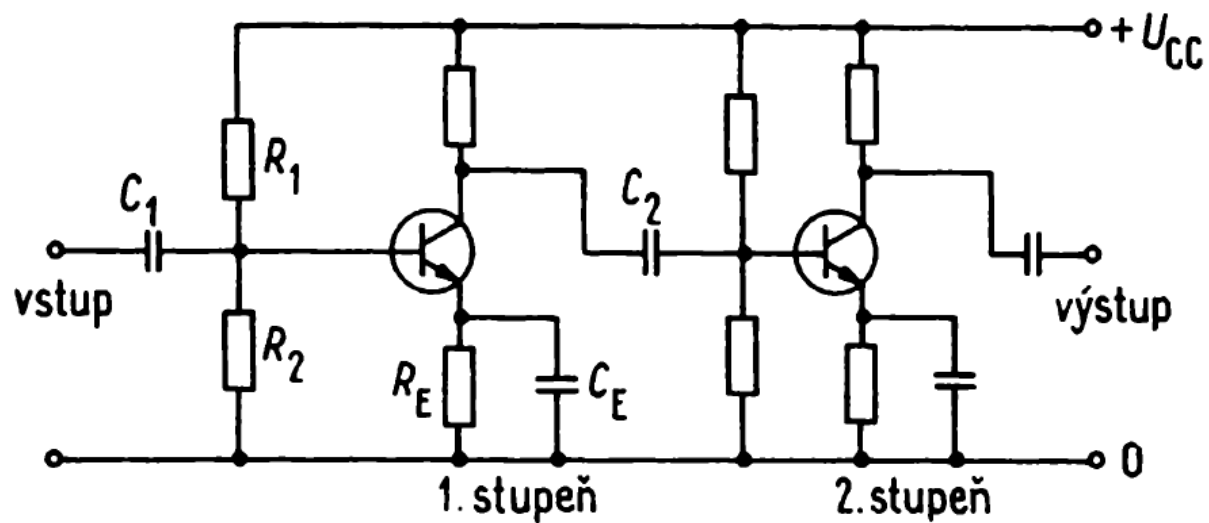


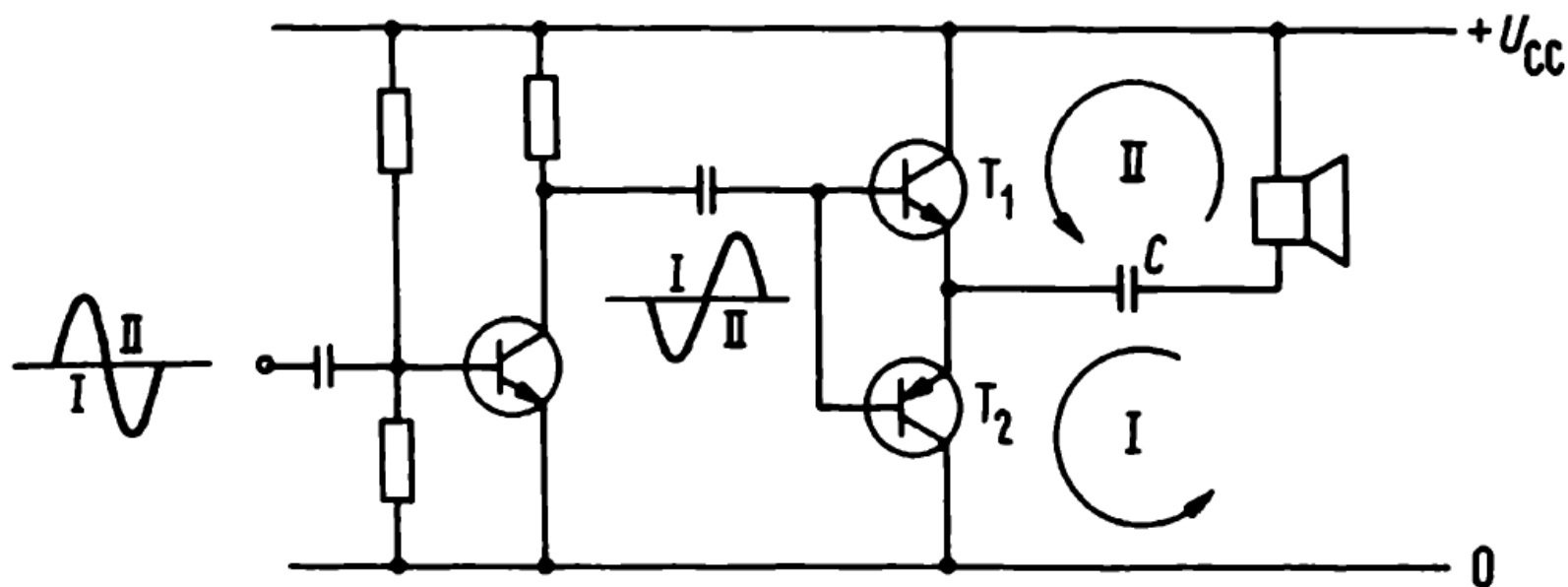
Vícestupňové zesilovače

- vícestupňové a dvojčinné zesilovače
- kaskoda - zapojení kombinace společný emitor-společná báze
- zapojení kombinace společný kolektor-společná báze
- diferenční zesilovač

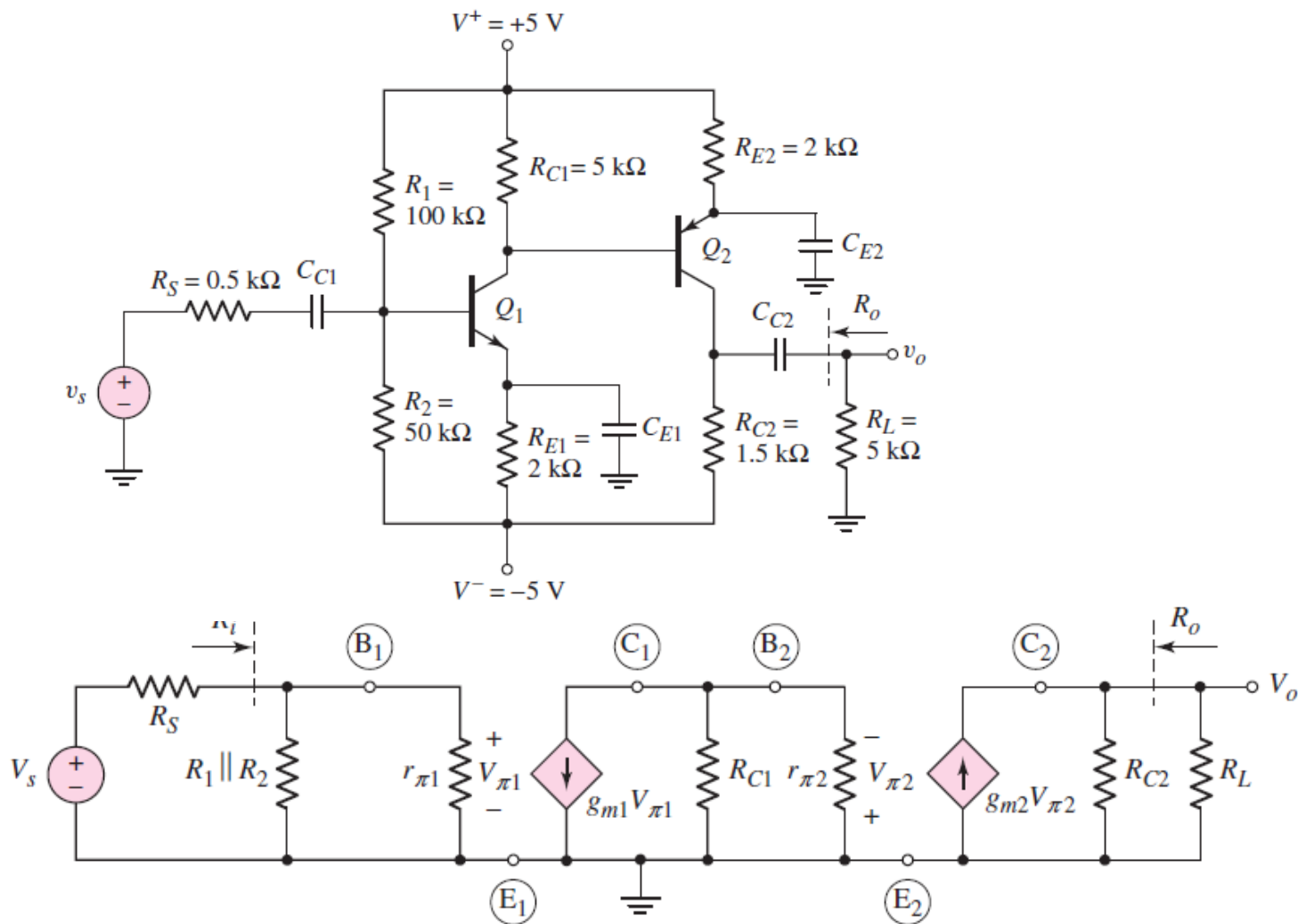
Vícestupňový zesilovač se společným emitorem a kapacitní vazbou pro nízké frekvence



Dvojčinný zesilovač pracující ve třídě B s komplementárními tranzistory
NPN-PNP pracující pro nízké frekvence



Kaskádní spojení dvou stupňů NPN-PNP se společným emitorem



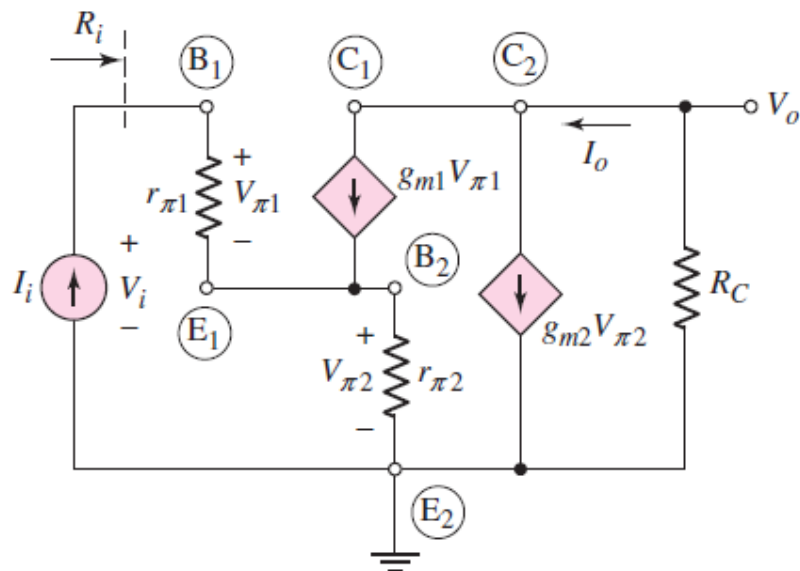
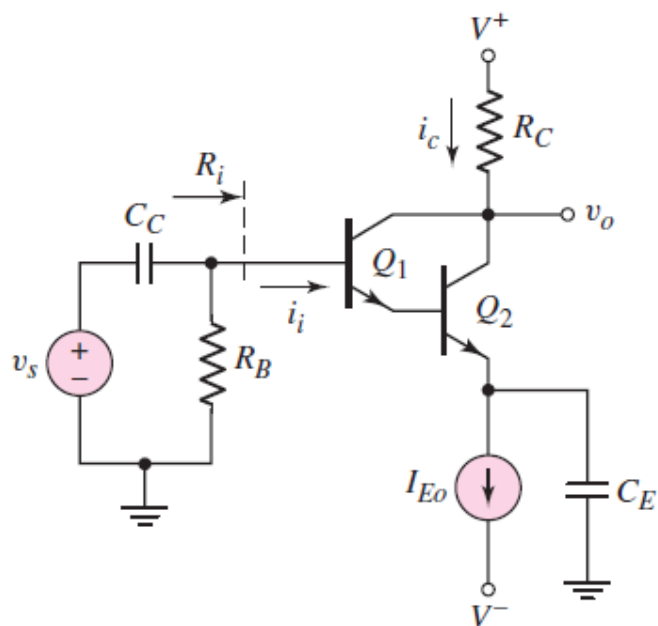
Pro napěťový zisk zesilovače
lze odvodit vztah:

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = g_{m1}g_{m2}(R_{C1} \parallel r_{\pi 2})(R_{C2} \parallel R_L) \left(\frac{R_i}{R_i + R_S} \right)$$

Darlingtonovo spojení tranzistorů

Lze dosáhnout velkého proudového zesílení spojených tranzistorů.

Bude nás zajímat proudové zesílení stupně a budeme uvažovat zdroj signálu jako proudový zdroj: $A_i = I_o / I_i$



Pro proudové zesílení platí: $A_i = \frac{I_o}{I_i} = \beta_1 + \beta_2(1 + \beta_1) \cong \beta_1 \beta_2$

Pro vstupní odpor zesilovače: $R_i = r_{\pi 1} + (1 + \beta_1)r_{\pi 2}$

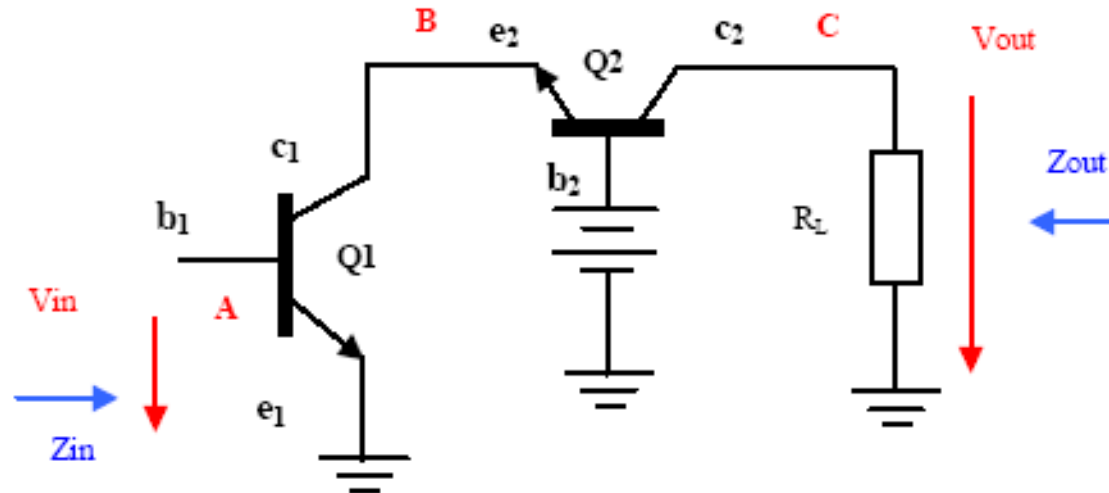
velké A_i
velké R_i

$$R_i \cong 2\beta_1 r_{\pi 2}$$

Kaskodový zesilovač SE-SB

Cascode BJT Circuit

A popular circuit for use at high frequencies is the cascode amplifier, as shown below:-



Gain of Q1 due to load of Q2

$$CE \text{ gain} = -g_{m1}R_{L1} \quad R_{IN} \text{ (CB stage)} = \frac{1}{g_{m2}}$$

$$A_{v1} = -g_{m1} \frac{1}{g_{m2}} \text{ which assuming transistors are matched} = 1$$

$$A_{v1} = -1$$

Miller capacitance

$$C_{SHUNT} = C_{BC}(1 - A_v) = C_{BC}(1 - (-1)) \quad C_{SHUNT} = 2C_{BC}$$

The miller capacitance across the input of the CE stage is double the Base collector capacitance of Q1.

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \approx - R_L gm$$

Output Impedance

$$R_{OUT} = R_L$$

Input Impedance

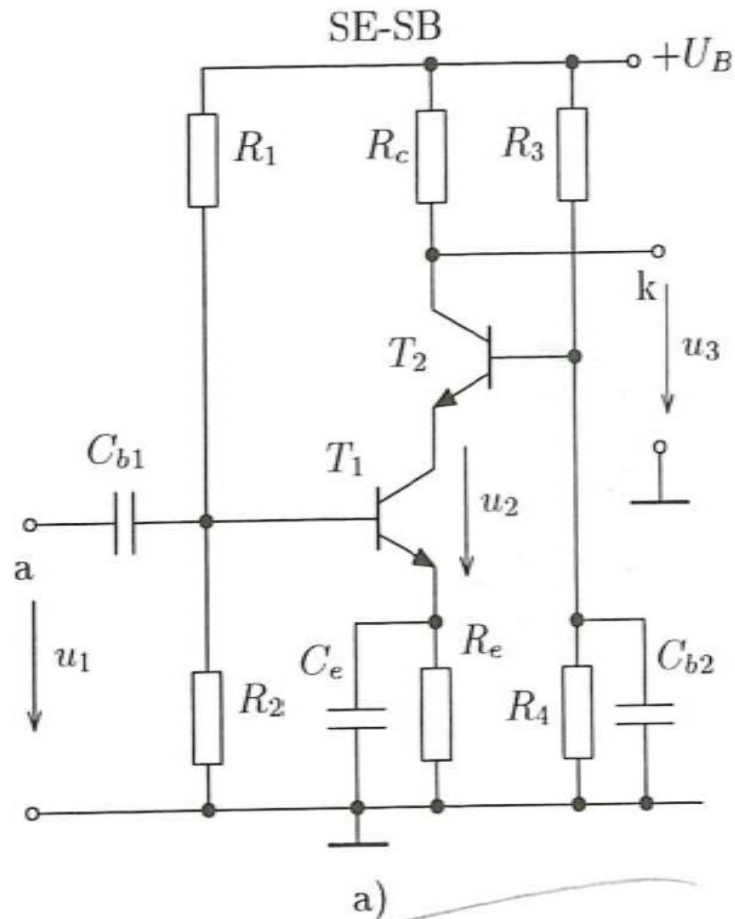
of Q1 at point A is $R_{IN} = \frac{\beta}{gm}$

Current gain (A_i) = A_i of the CE stage (A_i of CB stage = 1) = β

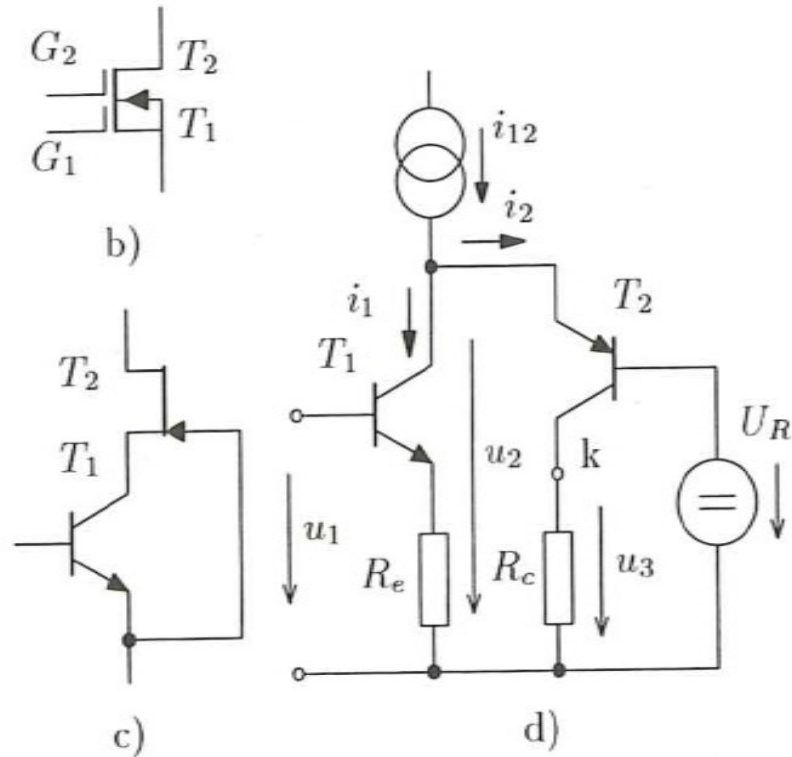
Kaskoda je vhodná pro RF aplikace díky vysoké horní mezní frekvenci. Má malou vstupní Millerovu kapacitu.

Příklady zapojení kaskodového zesilovače

- a) Úplné zapojení kaskodového zesilovače pro RF zesilovače z diskretních tranzistorů

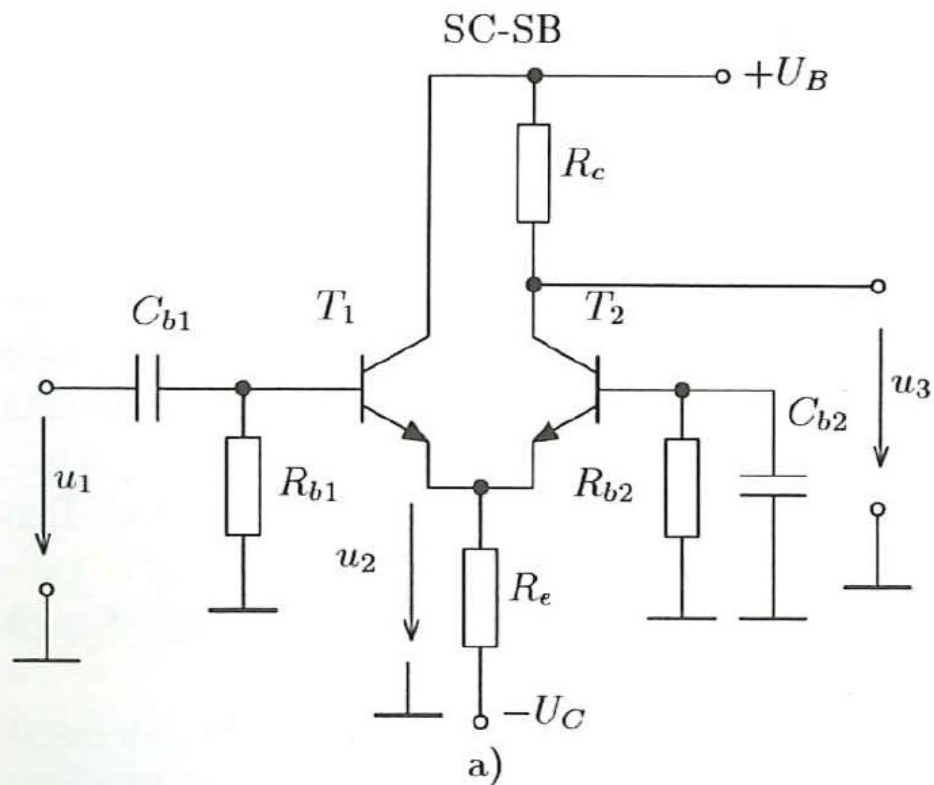


- d) Vhodné řešení pro rychlé operační zesilovače

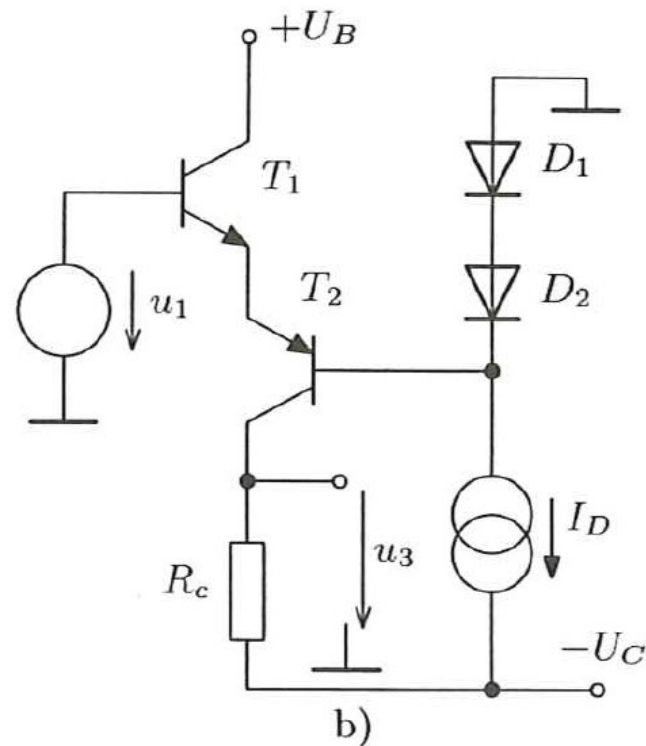


Zapojení společný kolektor-společná báze

pracuje do vysokých frekvencí, neprojevuje se Millerova kapacita



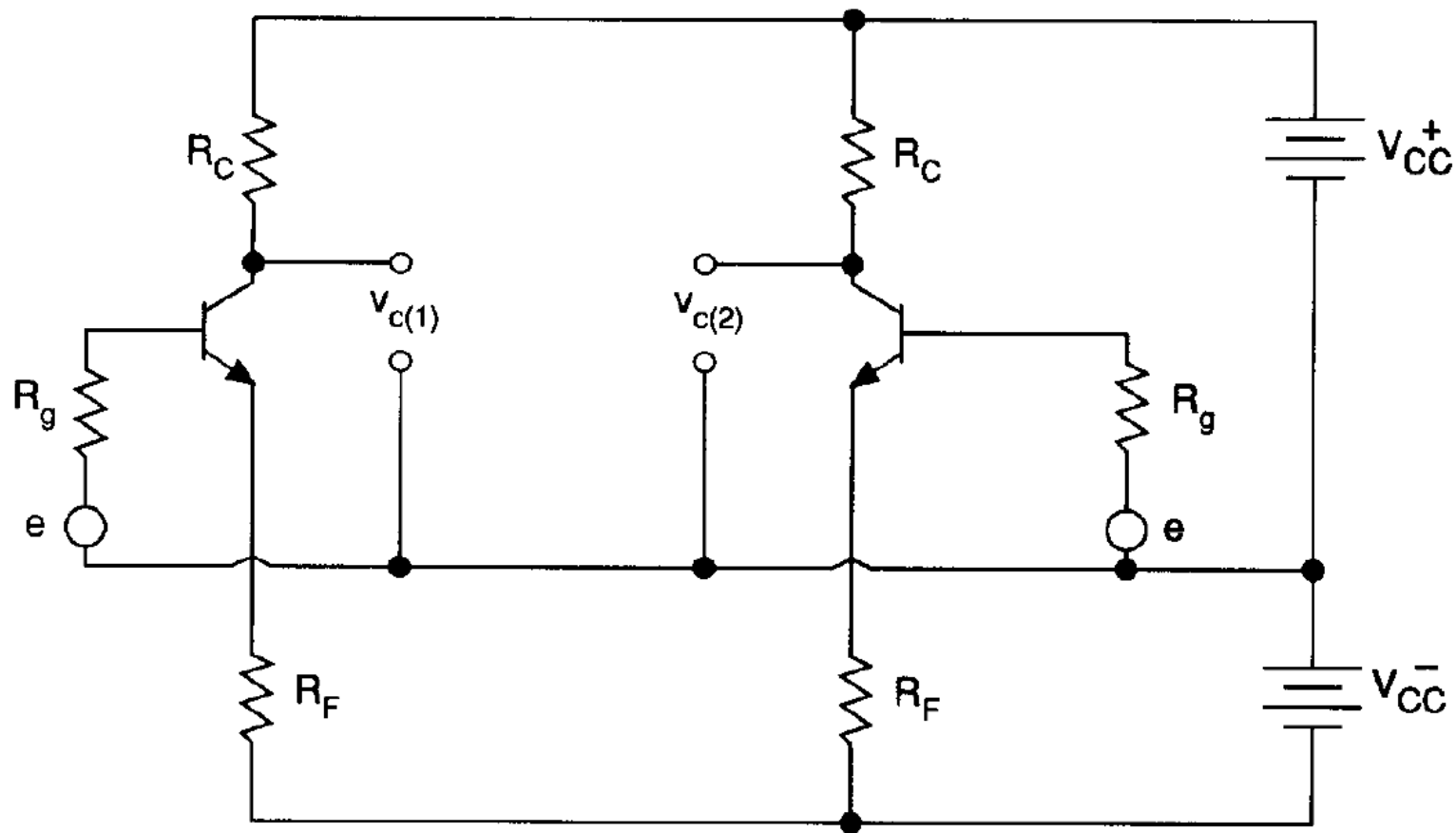
a) nepřebuditelný zesilovač (dostane se do saturace až když u_1 dosáhne U_B)



b) používá se často na vstupu operačních zesilovačů

Rozdílový zesilovač (diferenční zesilovač)

“Degenerovaný” stupeň se společným emitorem



Pro klidový proud I_Q kolektory obou tranzistorů můžeme napsat:

$$I_Q = \frac{|V_{CC}^-| - V_{BE}}{R_F}$$

předpokládejme stejné hodnoty obou vstupních signálů e
pak platí:

$$v_c = -i_c R_C \quad v_e = i_e R_F \simeq i_c R_F$$

$$\frac{v_c}{v_e} \simeq \frac{-i_c R_C}{i_c R_F} = -\frac{R_C}{R_F}$$

$$v_c = A_{v(dCE)} e$$

$$v_e = A_{v(CC)} e$$



$$\frac{A_{v(dCE)}}{A_{v(CC)}} \simeq -\frac{R_C}{R_F}$$

$A_{v(dCE)}$ - napěťový přenos stupně se společným emitorem

$A_{v(CC)}$ - napěťový přenos stupně se společným kolektorem

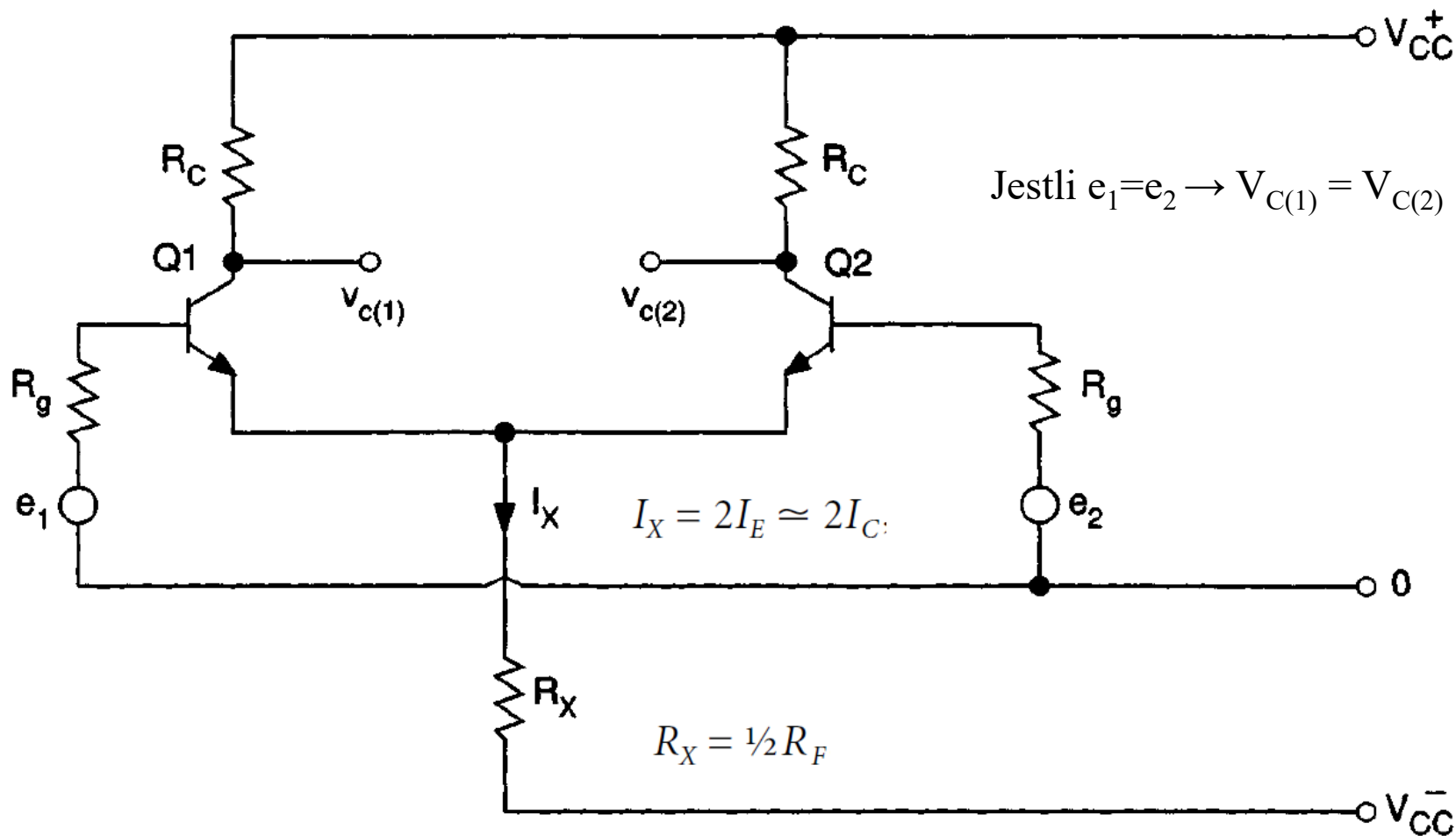
$$\simeq \frac{g_m R_F}{g_m R_F + 1} \simeq 1$$

$$A_{v(dCE)} \simeq -A_{v(CC)} \frac{R_C}{R_F} = -\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_F} \simeq -\frac{R_C}{R_F}$$

Pro zdroje e se vstupní odpor jeví jako vstupní odpor stupně se společným kolektorem:

$$R_{in(dCE)} = r_{bb'} + r_{b'e} + h_{fe}R_F \simeq h_{fe}R_F$$

diferenční zesilovač (vytvoříme z degenerovaného stupně spojením emitorů obou tranzistorů):



Diferenční zesilovač

Jestliže je: $e_1 = e_2$ tak zesílení pro toto napětí - součtové napětí

je $V_{c(1)} = V_{c(2)} = e_{1(2)} (-R_C/R_F)$ podobně jako pro degenerovaný stupeň

Jestliže $e_1 \neq e_2 \rightarrow e_1 - e_2 = e_{in}$ - diferenční vstupní signál

$$\frac{e_1 + e_2}{2} = e_{in(CM)} \quad \text{složka součtového signálu}$$

$$\frac{(e_1 - e_2)}{2} = e_{in(diff)} = \frac{1}{2} e_{in}$$

Platí vztahy: $e_1 = e_{in(CM)} + e_{in(diff)}$ $e_2 = e_{in(CM)} - e_{in(diff)}$

Pro diferenční vstupní signál $e_1 - e_2 = e_{in}$ v případě, že R_x je velké platí:

$$R_g + R_{in} = R_g + r_{bb'} + r_{b'e} + h_{fe} R_{emitter(2)}$$

$$R_{emitter(2)} = \frac{R_g + r_{bb'} + r_{b'e}}{h_{fe}} \quad R_g + R_{in} = 2(R_g + r_{bb'} + r_{b'e})$$

pak platí: $i_{b(1)} = -i_{b(2)} = \frac{e_1 - e_2}{2(R_g + r_{bb'} + r_{b'e})}$

z toho plyne: $v_{c(1)} = -v_{c(2)} = \frac{-h_{fe}R_C(e_1 - e_2)}{2(R_g + r_{bb'} + r_{b'e})}$

napěťový zisk pro diferenční vstupní signál je:

$$A_{ov} = \frac{v_c}{e_1 - e_2} = \frac{\pm h_{fe}R_C}{2(R_g + r_{bb'} + r_{b'e})}$$

$$A_v = \frac{\pm h_{fe}R_C}{2(r_{bb'} + r_{b'e})} \quad \text{bez zahrnutí } R_g$$

$$(V_{c(1)} - V_{c(2)}) / (e_1 - e_2) = A_{v(\text{diff})} = \frac{-h_{fe}R_C}{r_{bb'} + r_{b'e}} \simeq \frac{-h_{fe}R_C}{r_{b'e}} = -g_m R_C$$

a to je mnohem větší hodnota než zesílení součtového signálu $A_{CM} = -R_C / R_F$

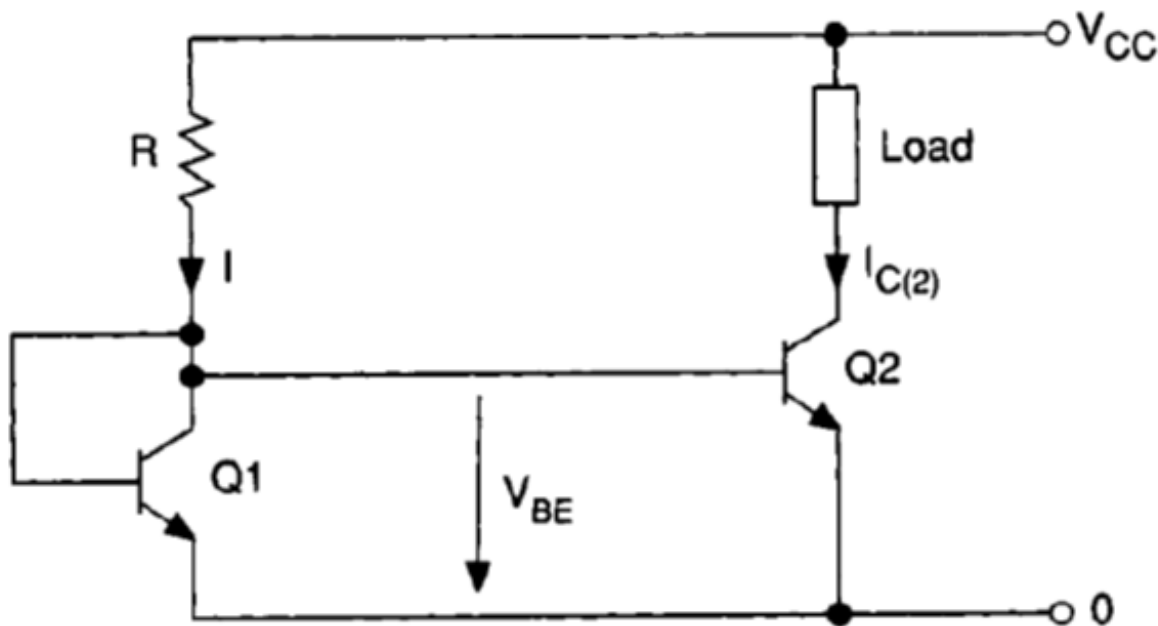
diferenční zesilovač potlačuje součtový signál → je odolnější vůči šumu na vstupních svorkách

Proudové zrcadlo (current mirror)

u diferenčního stupně musí být R_x co největší, aby jím neprocházel žádný signálový proud, ale pro jeho velké hodnoty pak musí být velké napájecí napětí pro daný klidový proud zesilovačem I_Q

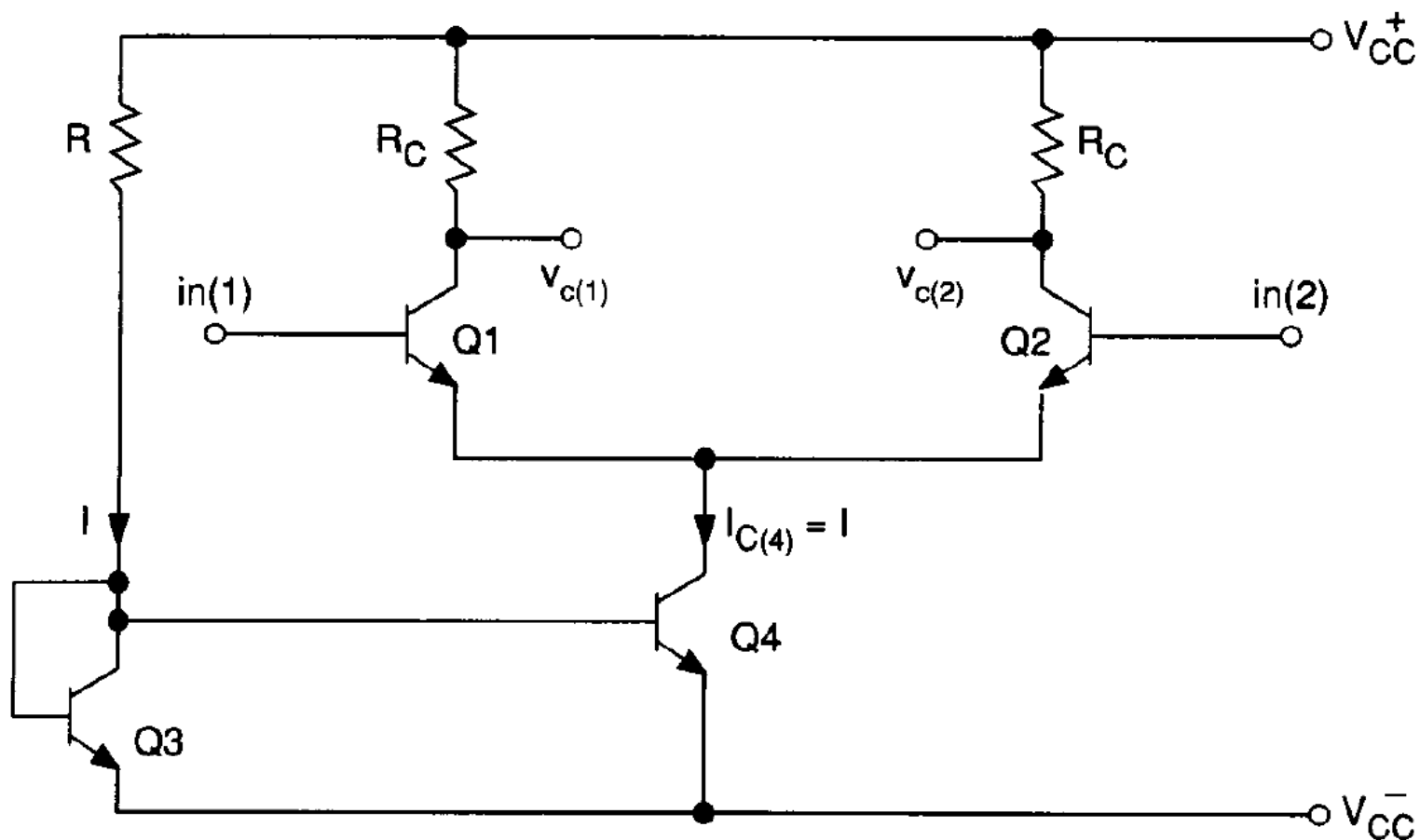
$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \quad I_{C(2)} = I \quad I_{C(2)} \text{ závisí pouze na } I \text{ a ne na zátěži Load}$$

Q2 má velký vnitřní diferenciální odpor r_{CE}



tranzistor Q_1 je stejný jako Q_2

diferenční stupeň s proudovým zrcadlem

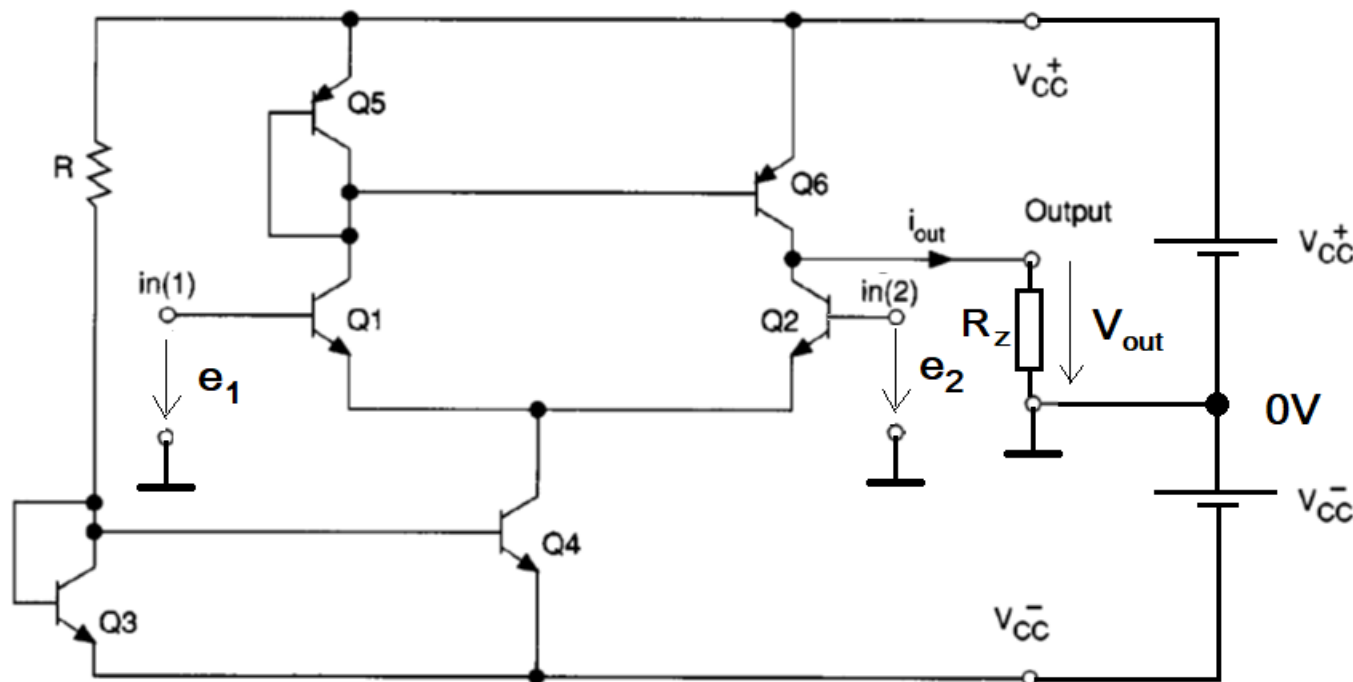


$$I_X = \frac{V_{CC^+} + |V_{CC^-}| - V_{BE(3)}}{R} = I$$

klidový proud I_X je velmi stabilní

A_{CM} tak je velmi malé

Diferenční stupeň s proudovým zrcadlem místo $R_C \rightarrow$ ten je pak obrovský pro signálový proud $i_C \rightarrow$ velký zisk pro diferenční signál $e_1 - e_2$



$$i_{out} = i_c(6) - i_c(2) \quad i_c(6) = i_c(5) \quad i_c(5) = i_c(1) \quad i_c(6) = i_c(1)$$

$$i_c(2) = -i_c(1) \longrightarrow i_{out} = i_c(1) + i_c(1) = 2i_c(1)$$

$$V_{out} = i_{out}R_z = 2i_c(1)R_z = 2h_{fe}i_{b1}R_z = 2h_{fe}\left(\frac{e_1 - e_2}{2r_{b'e'}}\right)R_z; \quad R_g, r_{bb'} \approx 0$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{e_1 - e_2} = \frac{V_{out}}{e_{in}} = \frac{2h_{fe}R_z}{2r_{b'e'}} = R_z g_m; \quad g_m = \frac{h_{fe}}{r_{b'e'}}$$

Literatura:

A. Frohn, W. Oberthur, H. Siedler, M. Wiemer, P. Zastrow, Elektronika-Polovodičové součástky a základní zapojení, BEN Praha 2006.

P. Neumann, J. Uhlíř, Elektronické obvody a funkční bloky 1, skriptum ČVUT (2005).

H. FRISCH, Základy elektroniky a elektronických obvodů, SNTL Praha 1987.

P. Horowitz, W. Hill, The art of Electronics, Third edition, Cambridge University Press, 1980, 1989, 2015.

Richard. C. Dorf, et. al., The electrical engineering handbook, Electronics, Power Electronics, Optoelectronics, Microwaves, Electromagnetics, and Radar Third edition, Taylor & Francis (2006).

Donald A. Neamen, Microelectronics Circuit Analysis and Design, Published by McGraw-Hill (2010).