

Osnove elektronike

III semestar

DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ

Diferencijalni pojačavač

Ulazni napon se dovodi na oba ulazna priključka.

Izlazni napon može biti diferencijalni, ali može biti i jednostruki.

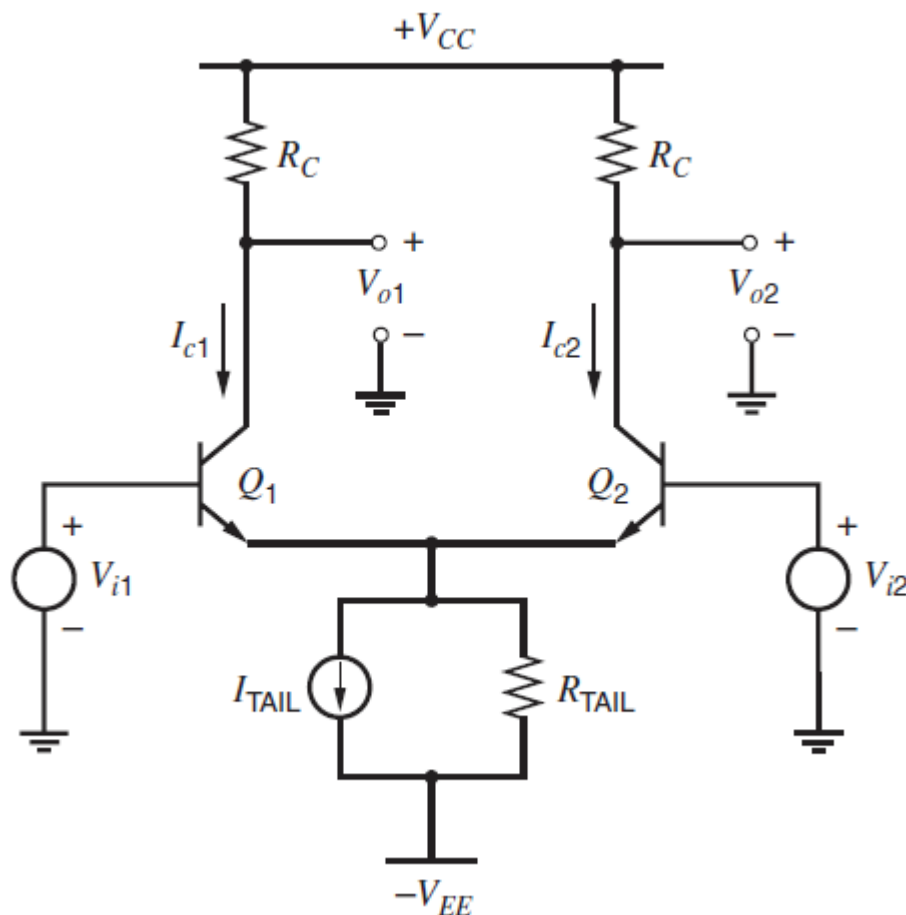
Ulazni tranzistori mogu biti:

- ❖ Bipolarni NPN
- ❖ Bipolarni PNP
- ❖ N-kanalni MOSFET (NMOS)
- ❖ P-kanalni MOSFET (PMOS).

Ulazni tranzistori mogu biti polarisani:

- ❖ strujnim izvorom (“idealnim” sa beskonačnom izlaznom otpornošću)
- ❖ strujnim izvorom (“realnim” sa konačnom izlaznom otpornošću)
- ❖ otpornikom (tipično samo u svrhu izračunavanja).

Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima



Idealan slučaj:

$$R_{TAIL} \rightarrow \infty$$

$$r_o \rightarrow \infty$$

Izračunavanje prenosne funkcije

$$V_{i1} - V_{be1} + V_{be2} - V_{i2} = 0$$

$$V_{be1} = V_T \ln \frac{I_{c1}}{I_{S1}}$$

$$V_{be2} = V_T \ln \frac{I_{c2}}{I_{S2}}$$

$$\frac{I_{c1}}{I_{c2}} = \exp \left(\frac{V_{i1} - V_{i2}}{V_T} \right) = \exp \left(\frac{V_{id}}{V_T} \right)$$

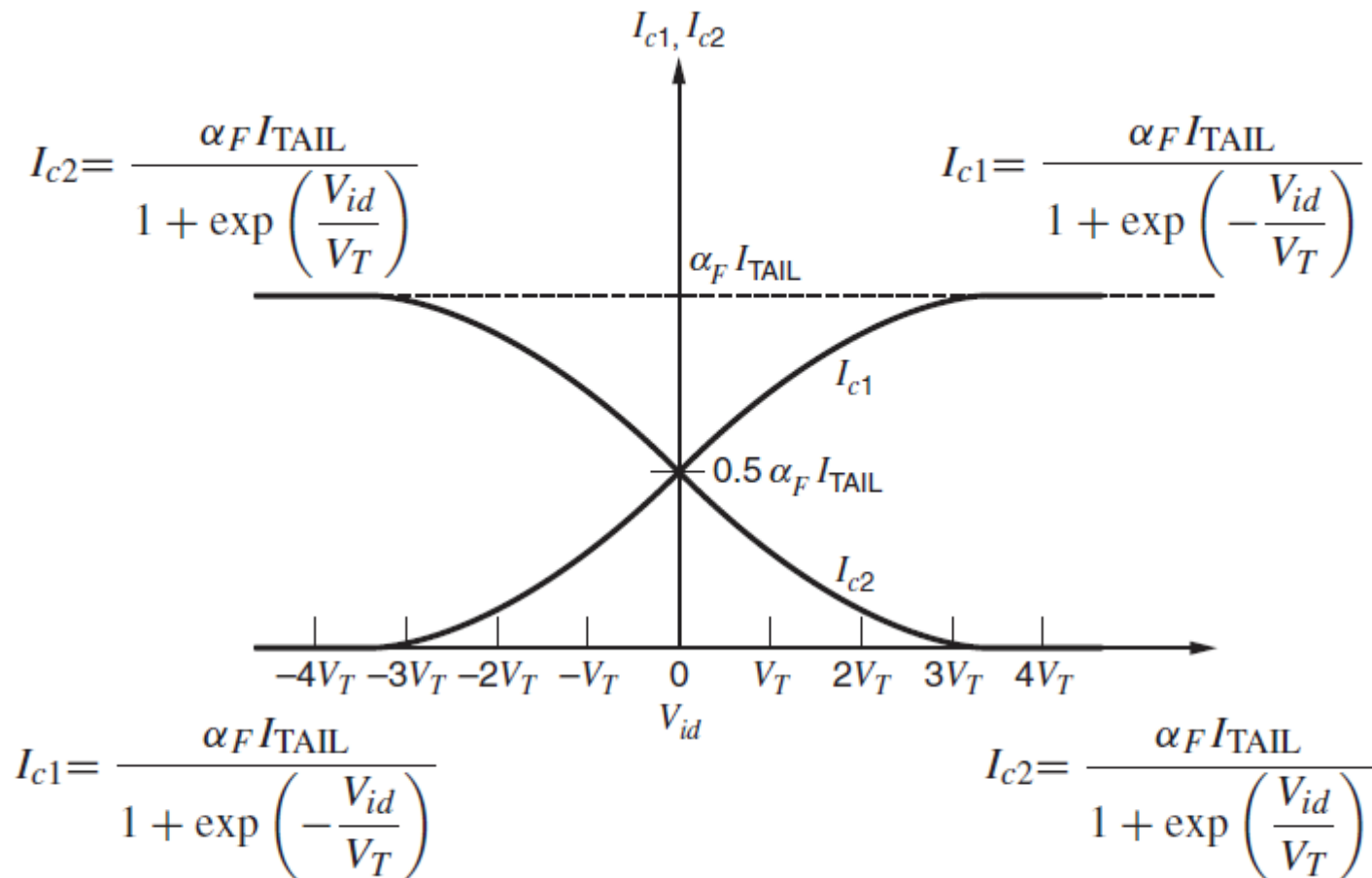
$$V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$$

$$I_{TAIL} = \frac{I_{c1} + I_{c2}}{\alpha_F}$$

$$I_{c1} = \frac{\alpha_F I_{TAIL}}{1 + \exp \left(-\frac{V_{id}}{V_T} \right)}$$

$$I_{c2} = \frac{\alpha_F I_{TAIL}}{1 + \exp \left(\frac{V_{id}}{V_T} \right)}$$

Prenosne funkcije struja

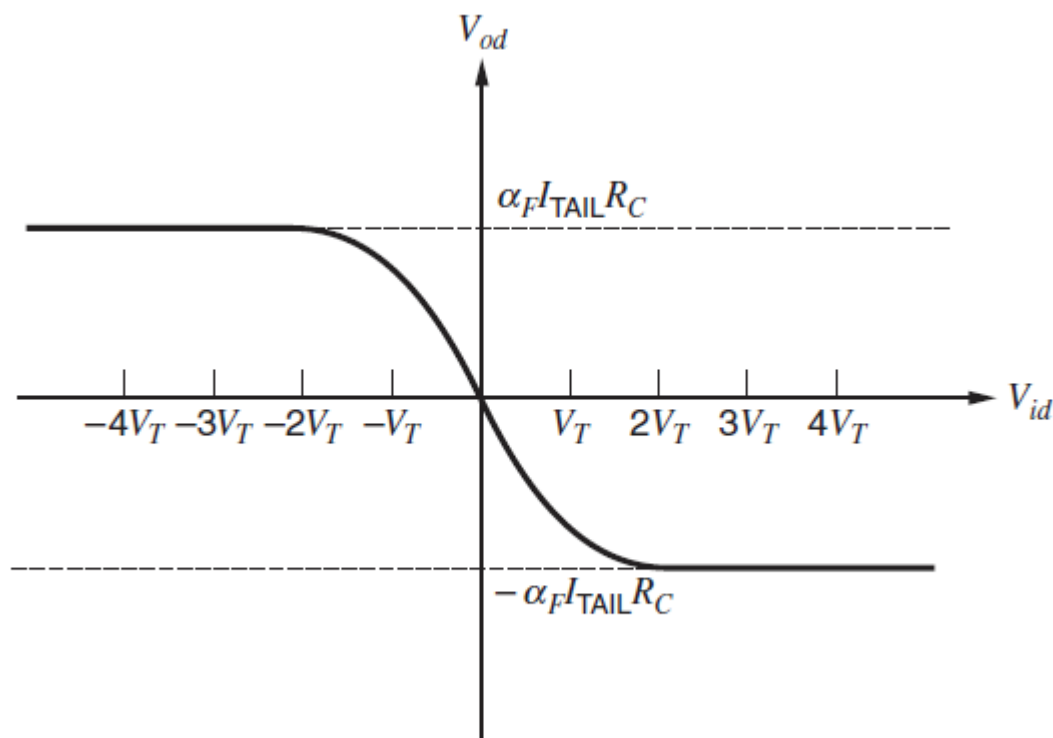


Izlazni diferencijalni napon

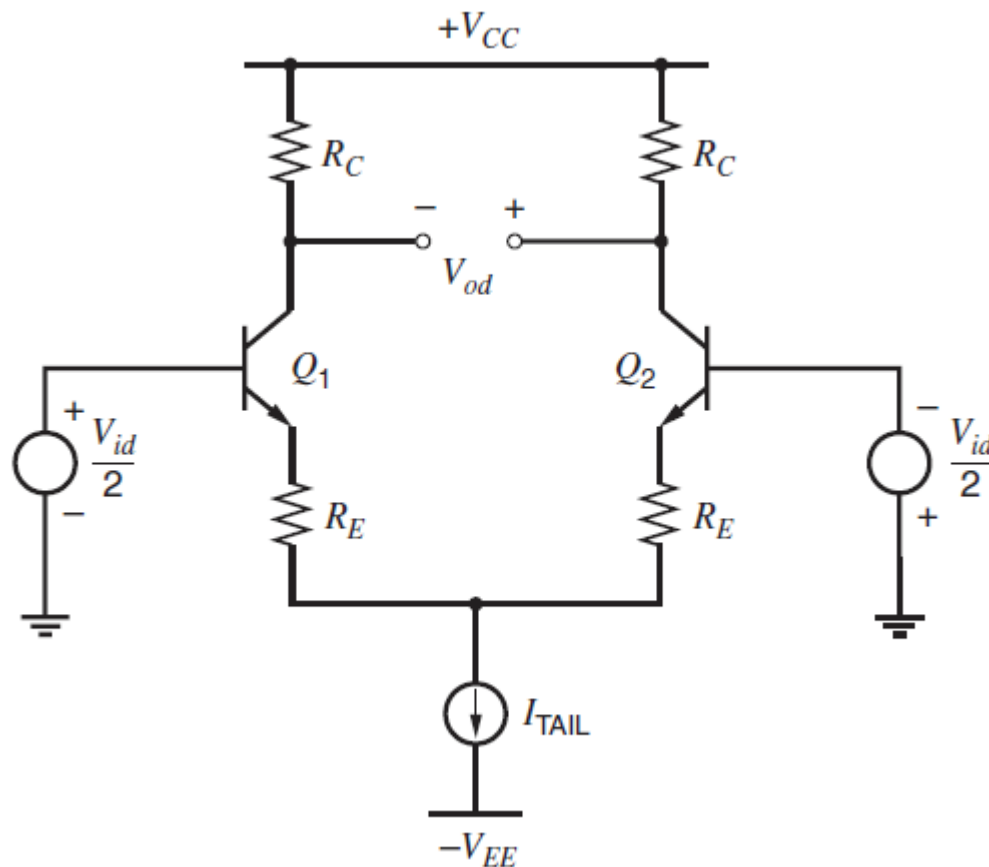
$$V_{o1} = V_{CC} - I_{c1}R_C$$

$$V_{o2} = V_{CC} - I_{c2}R_C$$

$$V_{od} = V_{o1} - V_{o2} = \alpha_F I_{TAIL} R_C \tanh\left(\frac{-V_{id}}{2V_T}\right)$$



Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima i otpornicima u emiterima

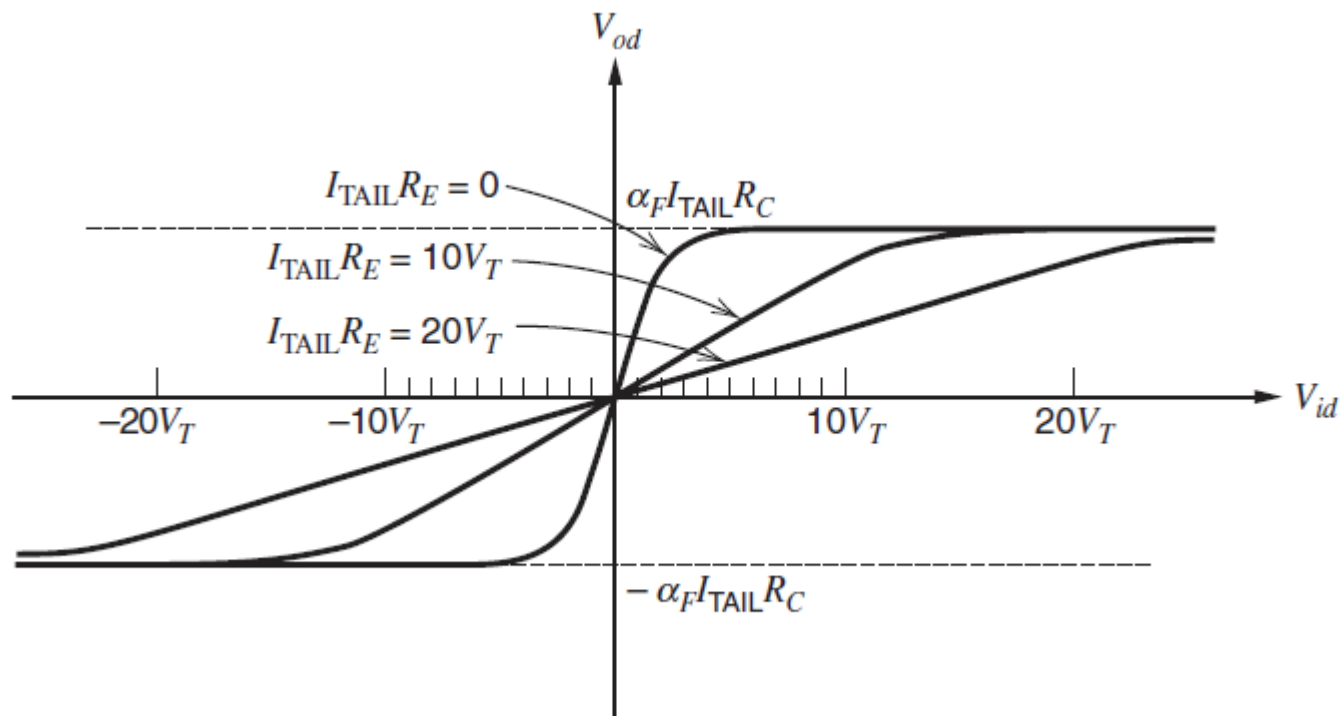


Idealan slučaj:

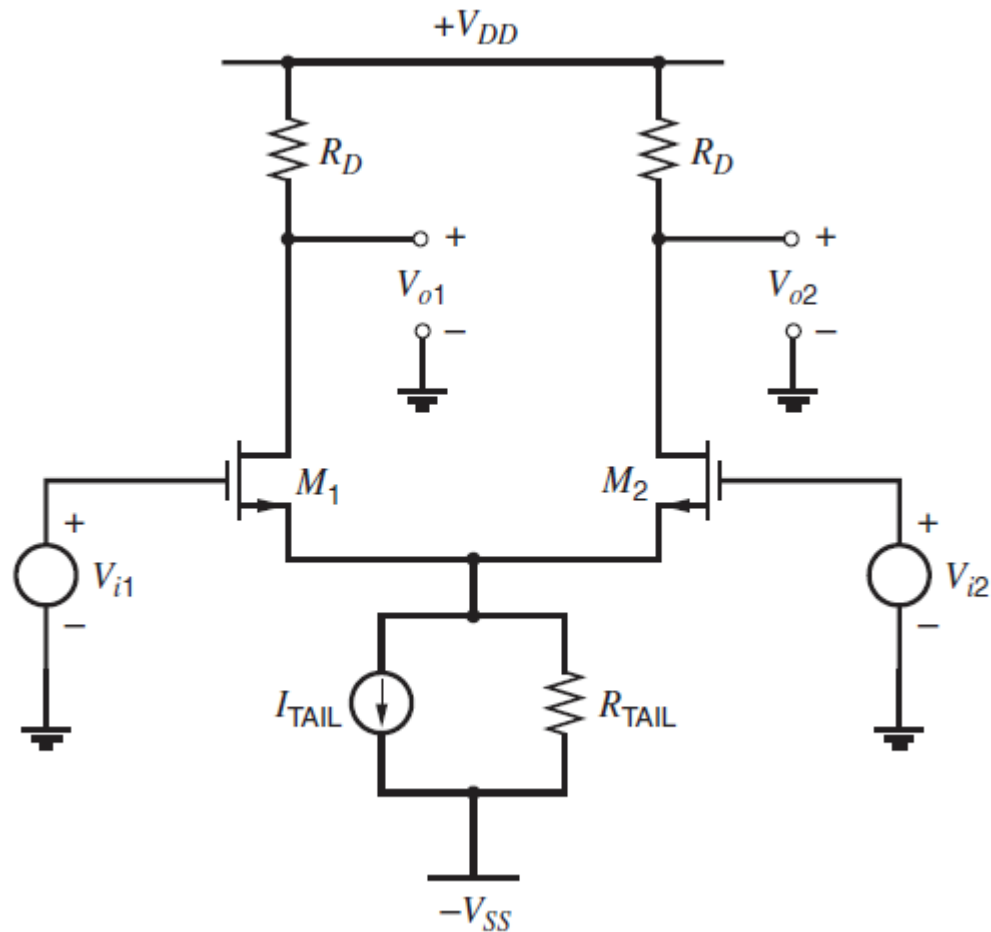
$$R_{TAIL} \rightarrow \infty$$

$$r_o \rightarrow \infty$$

Izlazni diferencijalni napon u zavisnosti od emitorskih otpornika



Diferencijalni pojačavač sa MOSFET-ima



Izračunavanje prenosne funkcije

$$v_{I1} - v_{GS1} + v_{GS2} - v_{I2} = 0$$

$$v_{ID} = v_{I1} - v_{I2} = v_{GS1} - v_{GS2}$$

$$i_{D1} \approx \frac{B}{2} (v_{GS1} - V_T)^2 \qquad v_{GS1} = V_T + \sqrt{\frac{2i_{D1}}{B}}$$

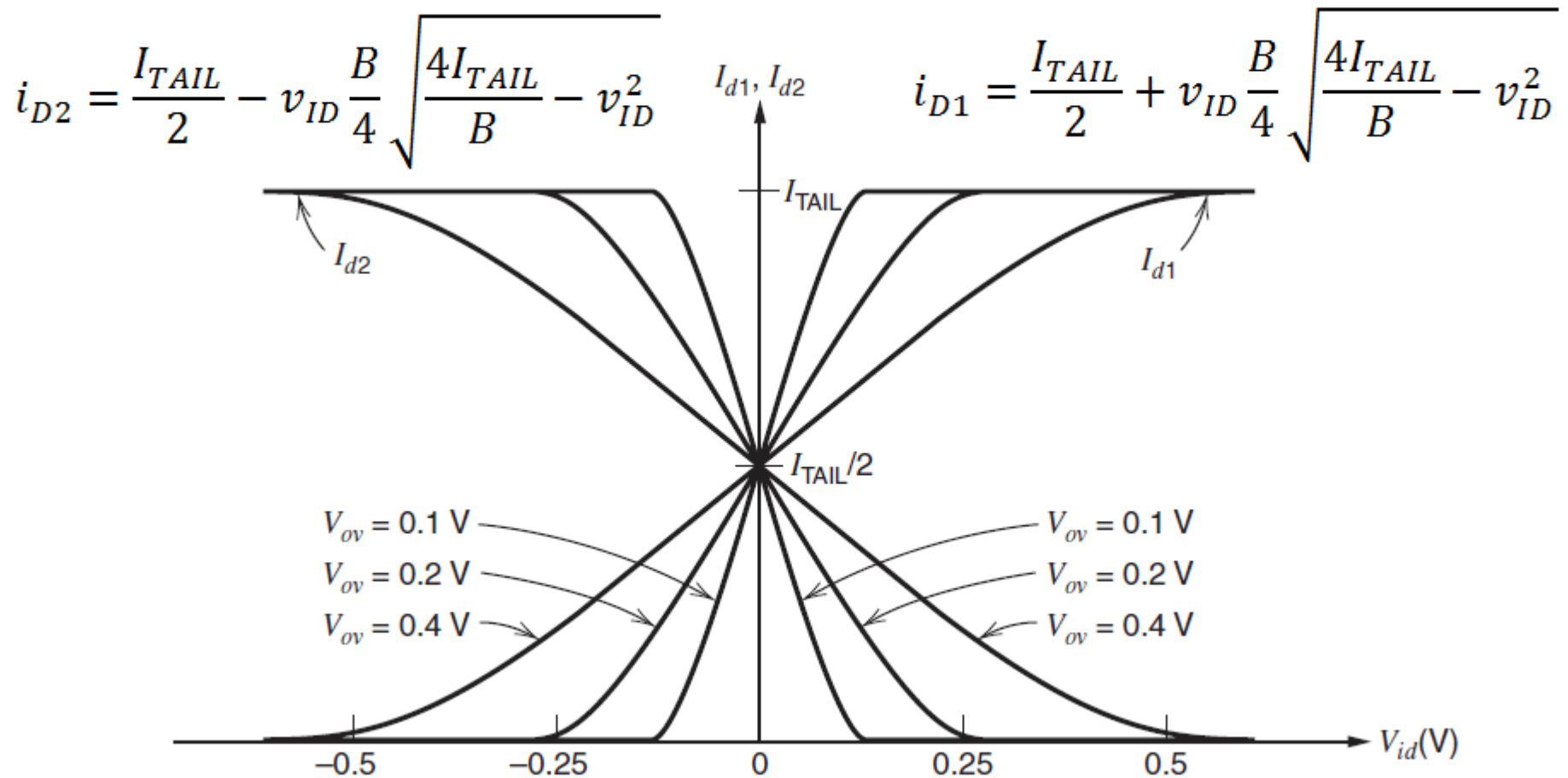
$$i_{D2} \approx \frac{B}{2} (v_{GS2} - V_T)^2 \qquad v_{GS2} = V_T + \sqrt{\frac{2i_{D2}}{B}}$$

$$v_{ID} = \sqrt{\frac{2}{B}} (\sqrt{i_{D1}} - \sqrt{i_{D2}})$$

$$I_{TAIL} = i_{D1} + i_{D2}$$

$$i_{D1} = \frac{I_{TAIL}}{2} + v_{ID} \frac{B}{4} \sqrt{\frac{4I_{TAIL}}{B} - v_{ID}^2} \qquad i_{D2} = \frac{I_{TAIL}}{2} - v_{ID} \frac{B}{4} \sqrt{\frac{4I_{TAIL}}{B} - v_{ID}^2}$$

Prenosne funkcije struja i napona



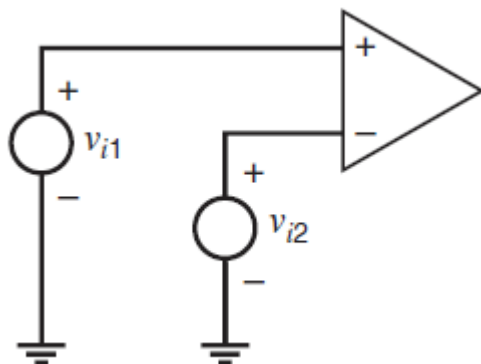
$$v_{OD} = v_{O1} - v_{O2} = V_{DD} - R_D i_{D1} - V_{DD} + R_D i_{D2} = R_D (i_{D2} - i_{D1})$$

Ulazni mali signali

Ulazni signali (sa indeksom i – input) se mogu predstaviti preko diferencijalnog signala (sa indeksom d – differential) i signala srednje vrednosti (sa indeksom c – common):

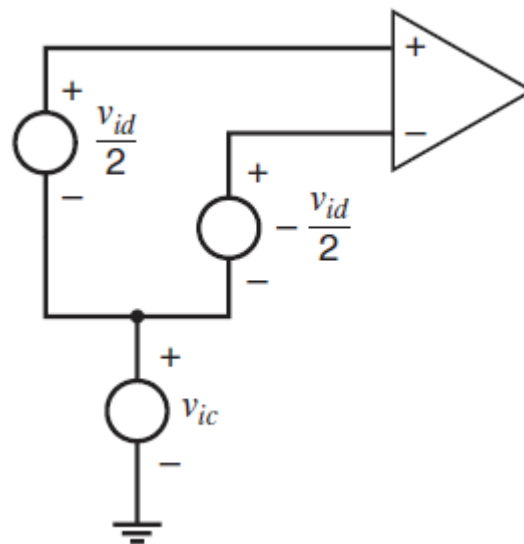
$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$$

$$v_{ic} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$



$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$



Pojačanja malih signala

Izlazni signali (sa indeksom o – output) u opštem slučaju nesimetrije diferencijalnog pojačavača zavise od ulaznih signala kao:

$$v_{o1} = A_{11}v_{i1} + A_{12}v_{i2}$$

$$v_{o2} = A_{21}v_{i1} + A_{22}v_{i2}$$

$$A_{11} = \left. \frac{v_{o1}}{v_{i1}} \right|_{v_{i2}=0}$$

$$A_{12} = \left. \frac{v_{o1}}{v_{i2}} \right|_{v_{i1}=0}$$

$$A_{21} = \left. \frac{v_{o2}}{v_{i1}} \right|_{v_{i2}=0}$$

$$A_{22} = \left. \frac{v_{o2}}{v_{i2}} \right|_{v_{i1}=0}$$

Izlazni mali signali

Izlazni signali (sa indeksom o – output) se mogu predstaviti kao:

$$v_{od} = v_{o1} - v_{o2}$$

$$v_{oc} = \frac{v_{o1} + v_{o2}}{2}$$

$$v_{o1} = v_{oc} + \frac{v_{od}}{2}$$

$$v_{o2} = v_{oc} - \frac{v_{od}}{2}$$

Iz prethodnih formula se dobija:

$$v_{od} = \left(\frac{A_{11} - A_{12} - A_{21} + A_{22}}{2} \right) v_{id} + (A_{11} + A_{12} - A_{21} - A_{22}) v_{ic}$$

$$v_{oc} = \left(\frac{A_{11} - A_{12} + A_{21} - A_{22}}{4} \right) v_{id} + \left(\frac{A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22}}{2} \right) v_{ic}$$

Pojačanja malih signala

Izlazni signali (sa indeksom o – output) se mogu predstaviti kao:

$$v_{od} = A_{dm}v_{id} + A_{cm-dm}v_{ic}$$

$$v_{oc} = A_{dm-cm}v_{id} + A_{cm}v_{ic}$$

$$A_{dm} = \left. \frac{v_{od}}{v_{id}} \right|_{v_{ic}=0} = \frac{A_{11} - A_{12} - A_{21} + A_{22}}{2}$$

$$A_{cm} = \left. \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \right|_{v_{id}=0} = \frac{A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22}}{2}$$

$$A_{dm-cm} = \left. \frac{v_{oc}}{v_{id}} \right|_{v_{ic}=0} = \frac{A_{11} - A_{12} + A_{21} - A_{22}}{4}$$

$$A_{cm-dm} = \left. \frac{v_{od}}{v_{ic}} \right|_{v_{id}=0} = A_{11} + A_{12} - A_{21} - A_{22}$$

Faktor potiskivanja signala srednje vrednosti

U slučaju idealno simetričnog diferencijalnog pojačavača:

1. za diferencijalni signal na ulazu v_{id} :

$$v_{i1} = -v_{i2} \quad v_{ic} = 0 \quad v_{oc} = 0 \quad A_{dm-cm} = 0 \quad v_{od} = A_{dm}v_{id}$$

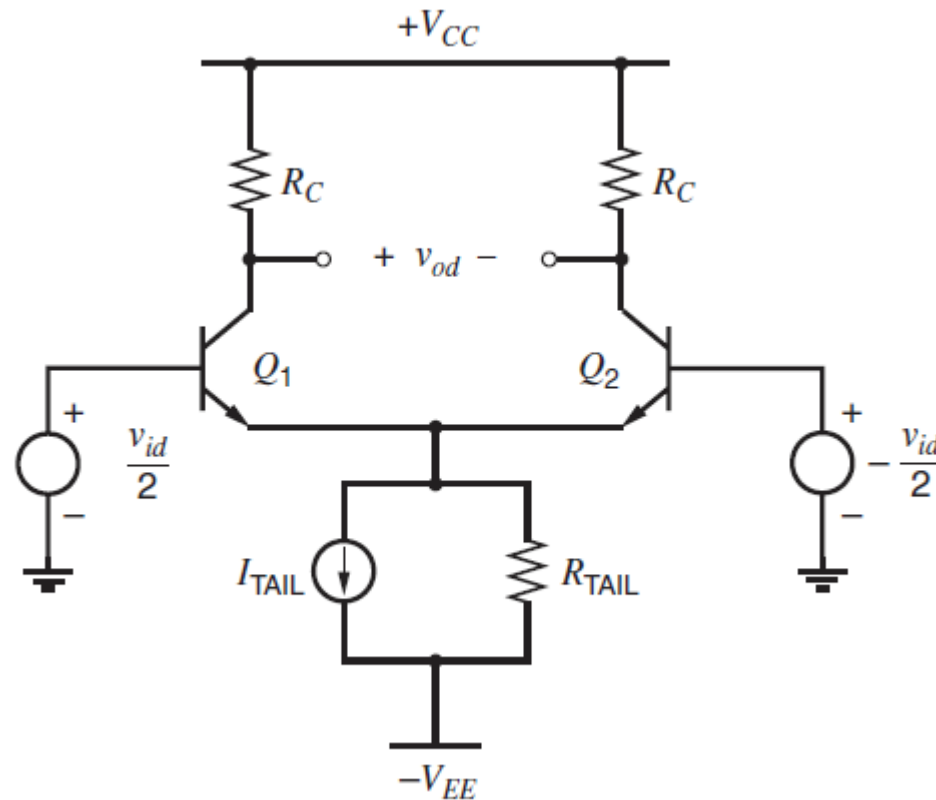
2. za signal srednje vrednosti na ulazu v_{ic} :

$$v_{i1} = v_{i2} \quad v_{id} = 0 \quad v_{od} = 0 \quad A_{cm-dm} = 0 \quad v_{oc} = A_{cm}v_{ic}$$

Faktor potiskivanja signala srednje vrednosti (common-mode-rejection ratio ili CMRR) se definiše kao:

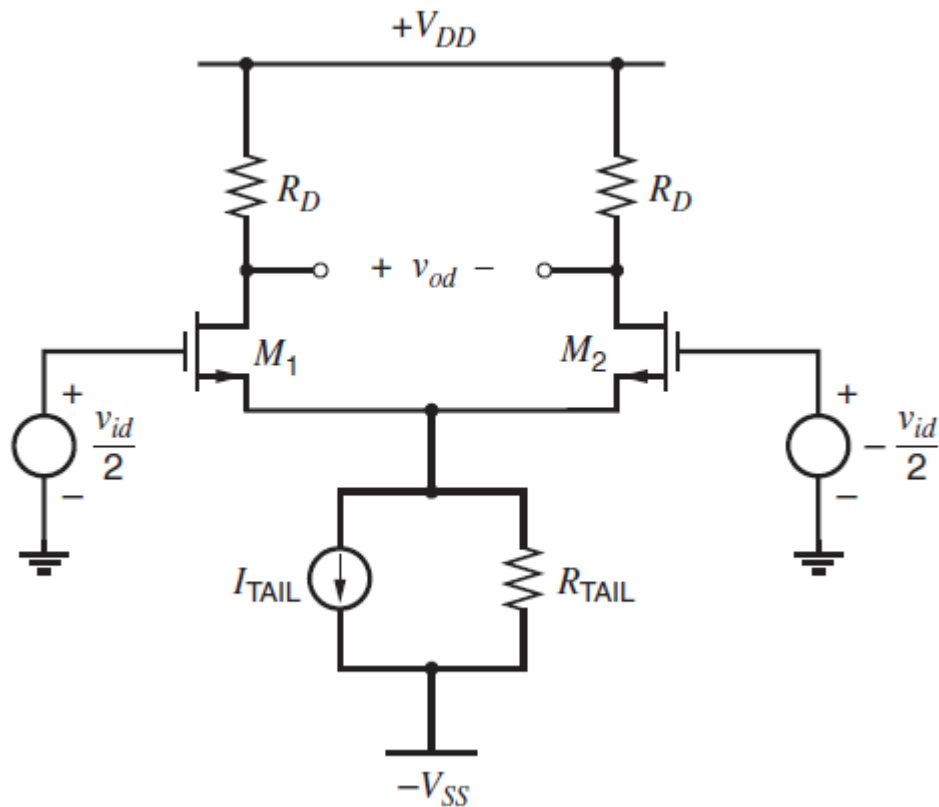
$$\text{CMRR} \equiv \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right|$$

Diferencijalno pojačanje za idealno simetričan diferencijalni pojačavač

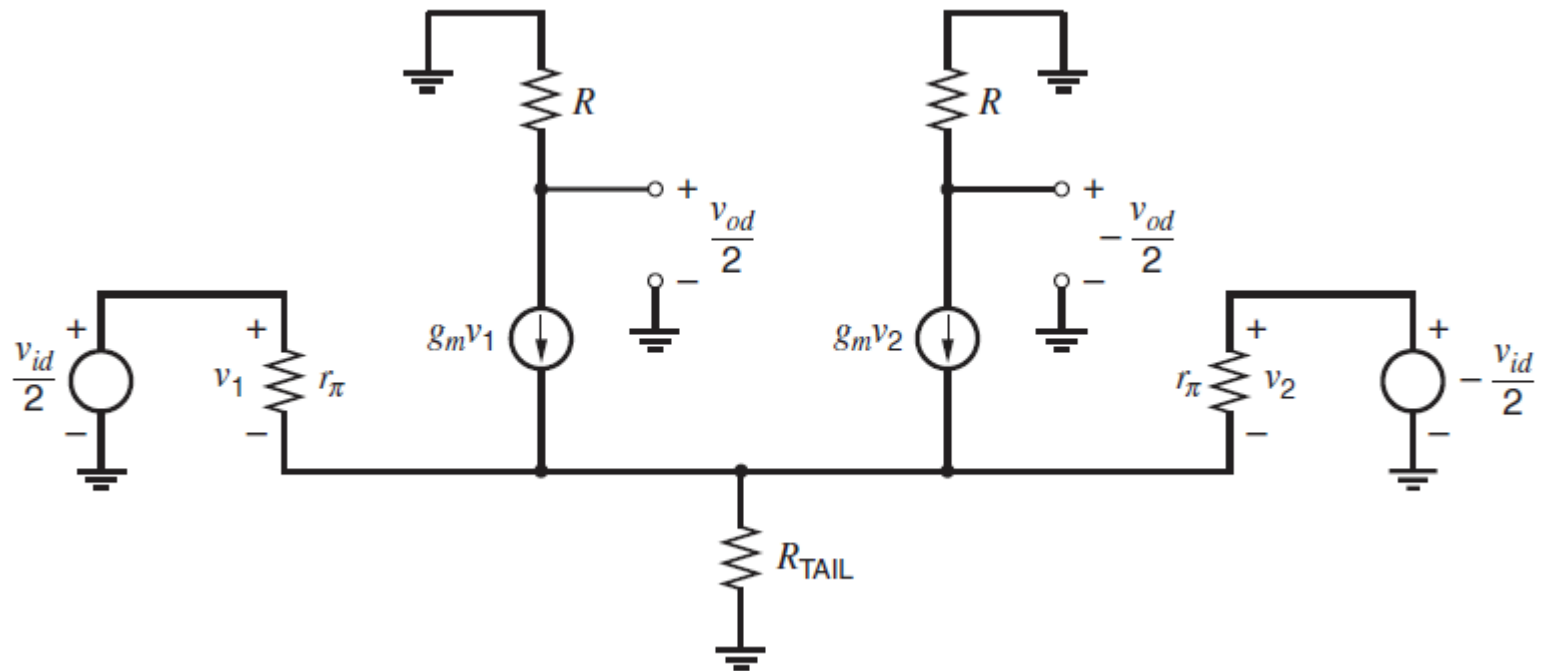


Diferencijalno pojačanje za idealno simetričan diferencijalni pojačavač

Šeme za male signale diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima i $r_{\pi} \rightarrow \infty$ se mogu koristiti i za MOSFET-e.

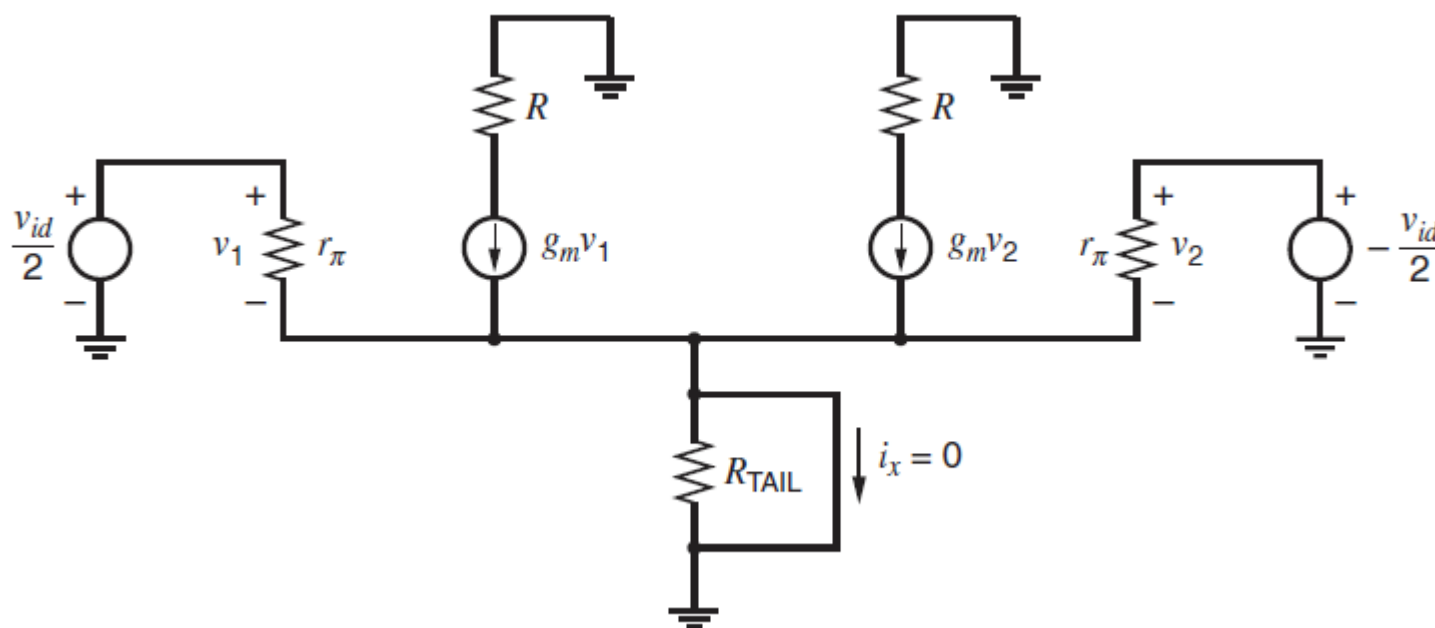


Ekvivalentna šema za određivanje diferencijalnog pojačanja



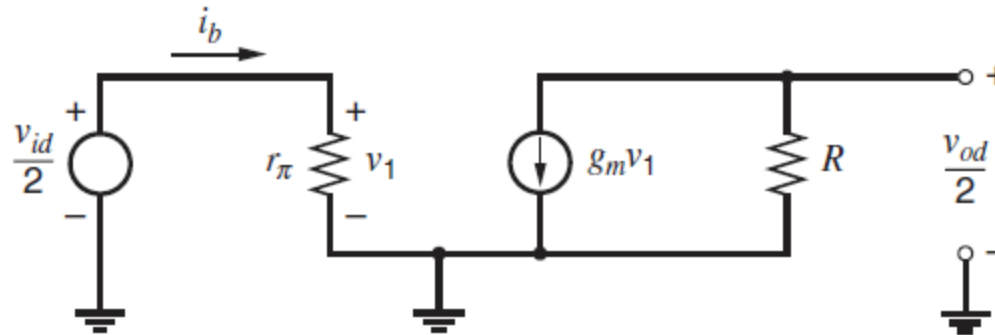
Ekvivalentna šema za određivanje diferencijalnog pojačanja

Prema bisekcionoj teoremi, napon za male signale između simetričnih delova šeme sa diferencijalnim ulazima je nula, tako da se može kratko spojiti sa masom, pri čemu kroz kratak spoj nema struje.



$\frac{1}{2}$ ekvivalentne šeme za određivanje diferencijalnog pojačanja

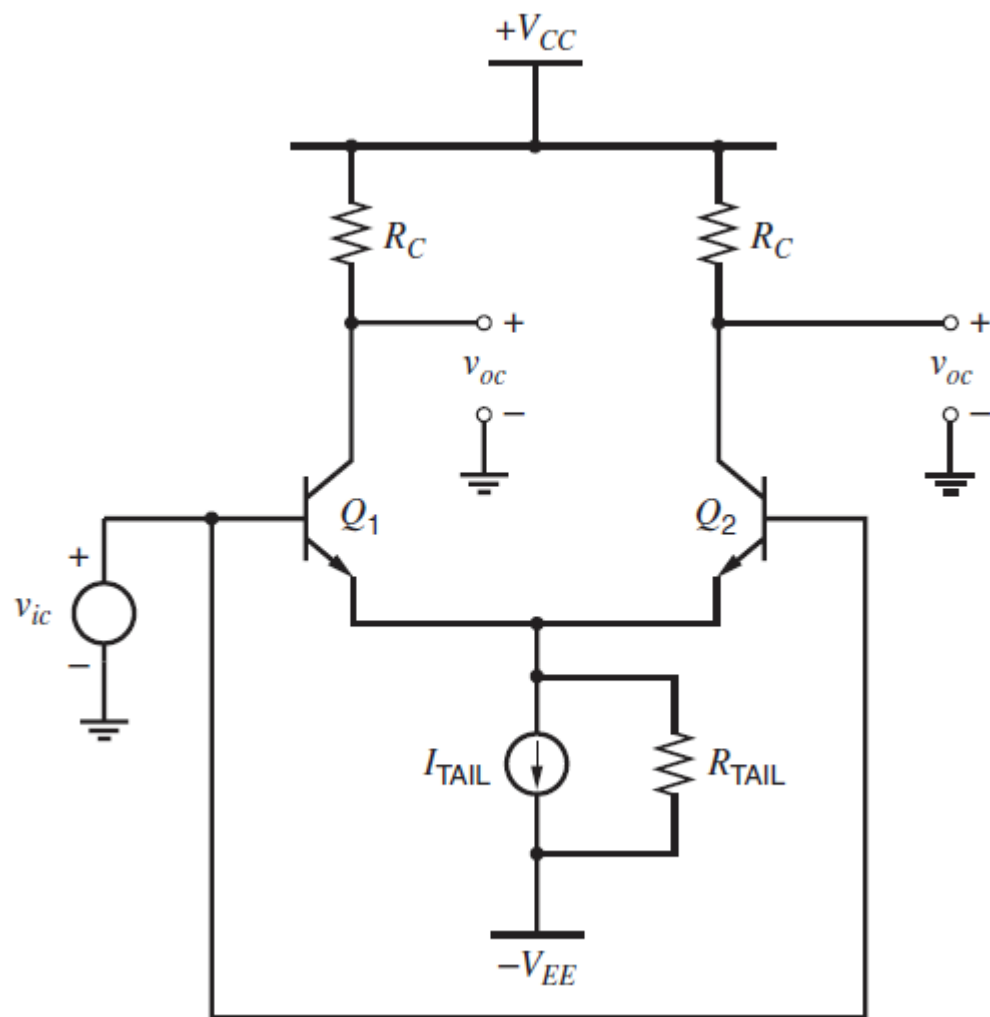
Prema bisekcionoj teoremi, moguće je razmatrati samo polovinu simetrične šeme za diferencijalni ulazni signal.



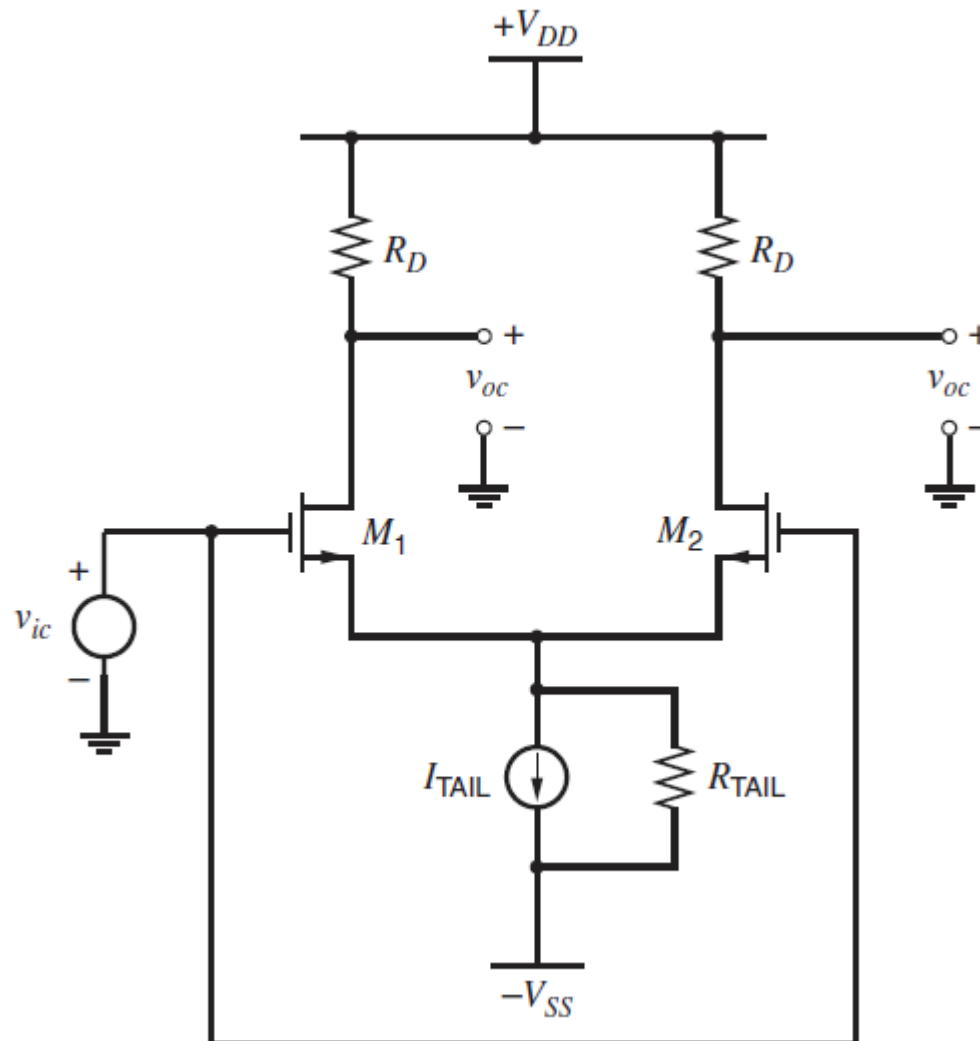
$$\frac{v_{od}}{2} = -g_m R \frac{v_{id}}{2}$$

$$A_{dm} = \left. \frac{v_{od}}{v_{id}} \right|_{v_{ic}=0} = -g_m R$$

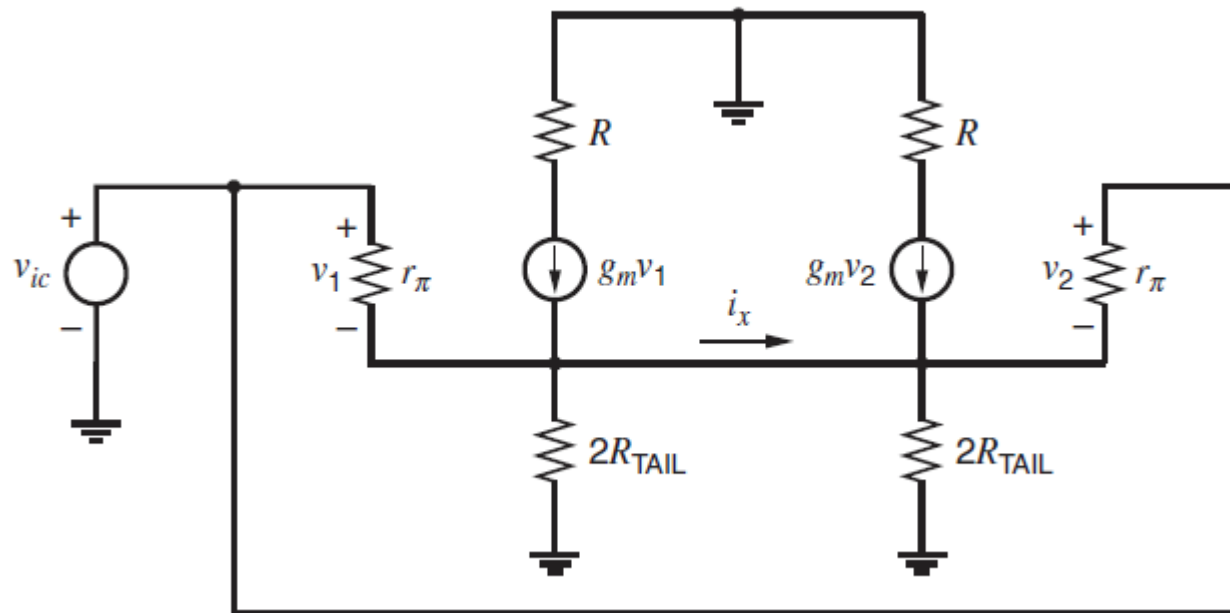
Pojačanje srednje vrednosti za idealno simetričan diferencijalni pojačavač



Pojačanje srednje vrednosti za idealno simetričan diferencijalni pojačavač

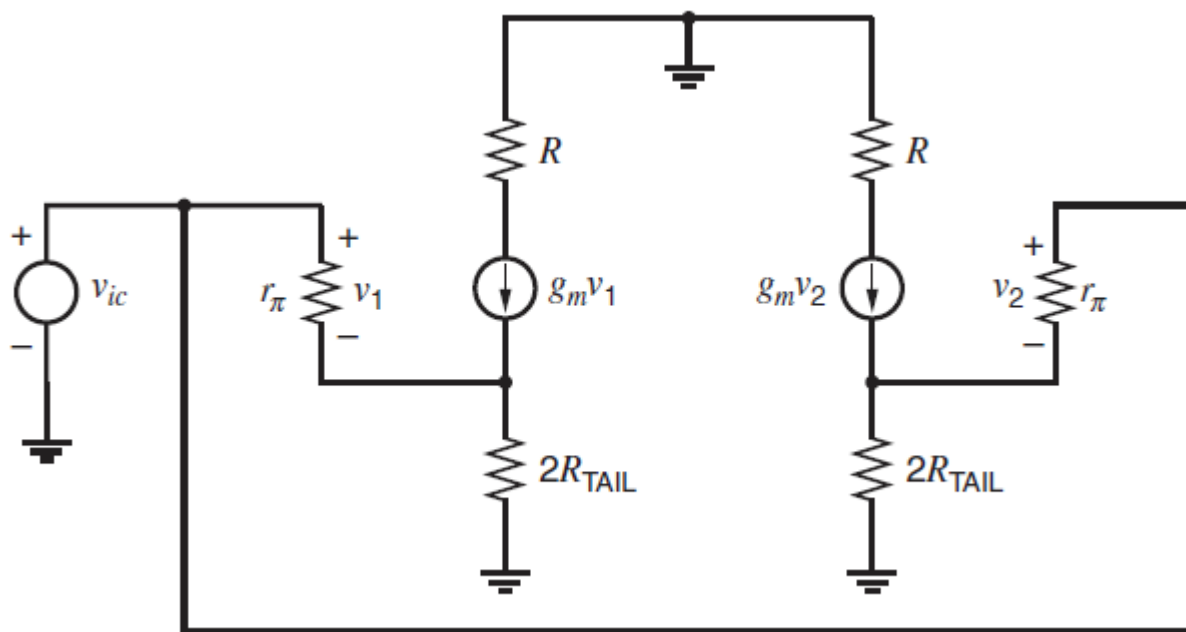


Ekvivalentna šema za određivanje pojačanja srednje vrednosti



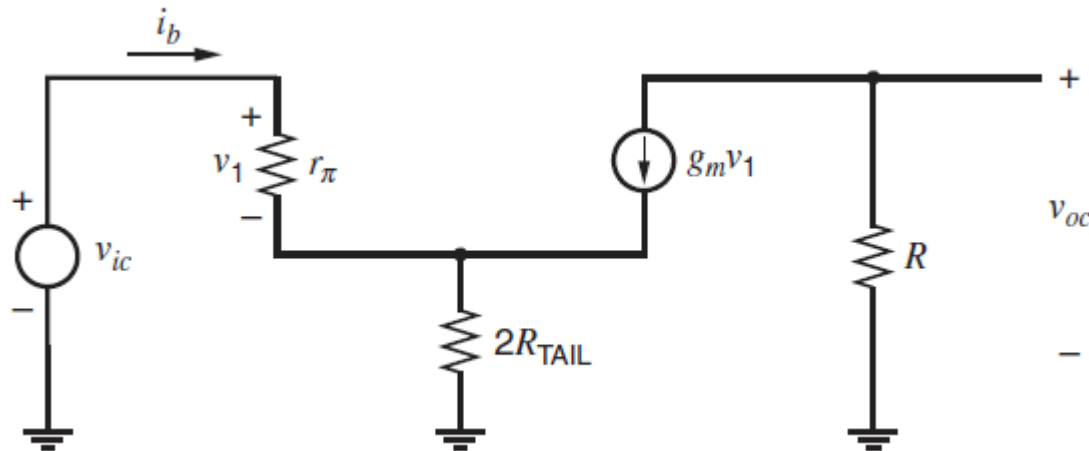
Ekvivalentna šema za određivanje pojačanja srednje vrednosti

Prema bisekcionoj teoremi, struja za male signale između simetričnih delova šeme sa ulazom signala srednje vrednosti je nula, tako da se veza između tih delova šeme može raskinuti.



$\frac{1}{2}$ ekvivalentne šeme za određivanje diferencijalnog pojačanja

Prema bisekcionoj teoremi, moguće je razmatrati samo polovinu simetrične šeme za ulazni signal srednje vrednosti.



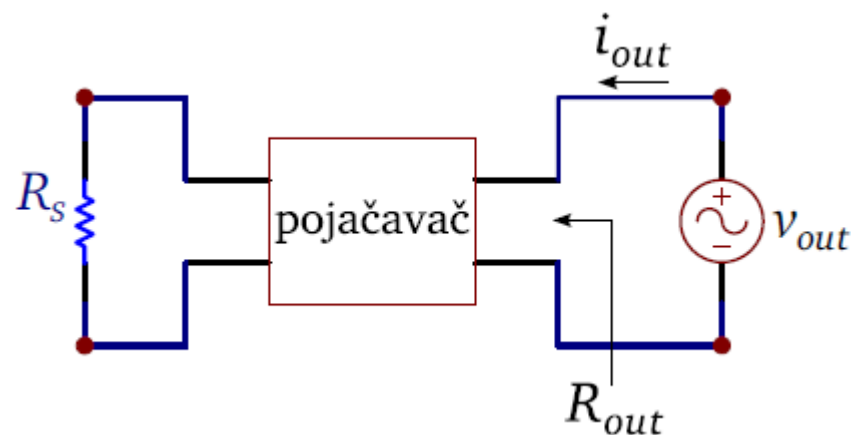
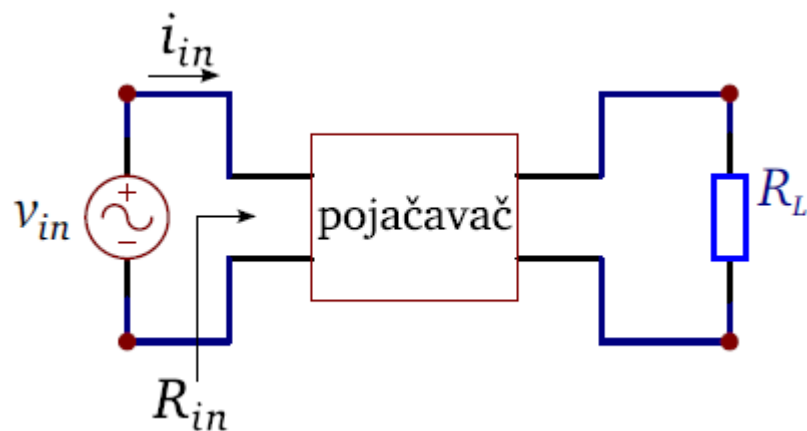
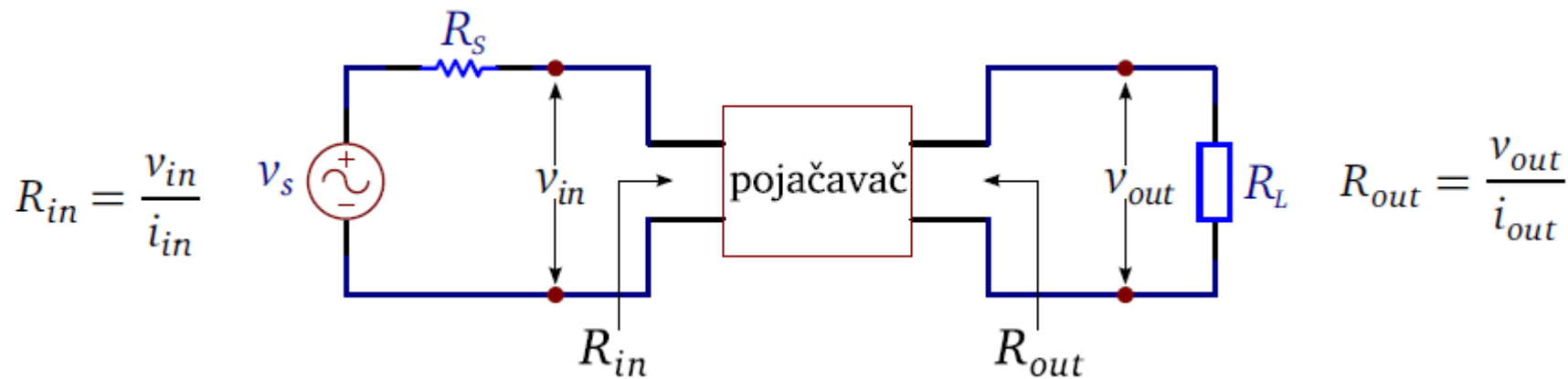
$$v_{oc} = -G_m R v_{ic}$$

$$A_{cm} = \left. \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \right|_{v_{id}=0} = -G_m R$$

$$A_{cm} \simeq -\frac{g_m R}{1 + g_m (2R_{TAIL})} = -\frac{g_m R}{1 + 2g_m R_{TAIL}}$$

$$CMRR = 1 + 2g_m R_{TAIL}$$

Kola za određivanje ulazne i izlazne otpornosti



Ulazne otpornosti diferencijalnog pojačavača

Ulazna diferencijalna otpornost za MOSFET-e je beskonačna, a za bipolarne tranzistore je konačna:

$$\frac{v_{id}}{2} = i_b r_\pi \qquad R_{id} = \left. \frac{v_{id}}{i_b} \right|_{v_{ic}=0} = 2r_\pi$$

Ulazna otpornost za signal srednje vrednosti za MOSFET-e je beskonačna, a za bipolarne tranzistore konačna:

$$R_{ic} = \left. \frac{v_{ic}}{i_b} \right|_{v_{id}=0} = r_\pi + (\beta_0 + 1)(2R_{TAIL})$$

Ulazne struje se dobijaju superpozicijom:

$$i_{b1} = \frac{v_{id}}{R_{id}} + \frac{v_{ic}}{R_{ic}} \qquad i_{b2} = -\frac{v_{id}}{R_{id}} + \frac{v_{ic}}{R_{ic}}$$

Osnove elektronike

III semestar

DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ