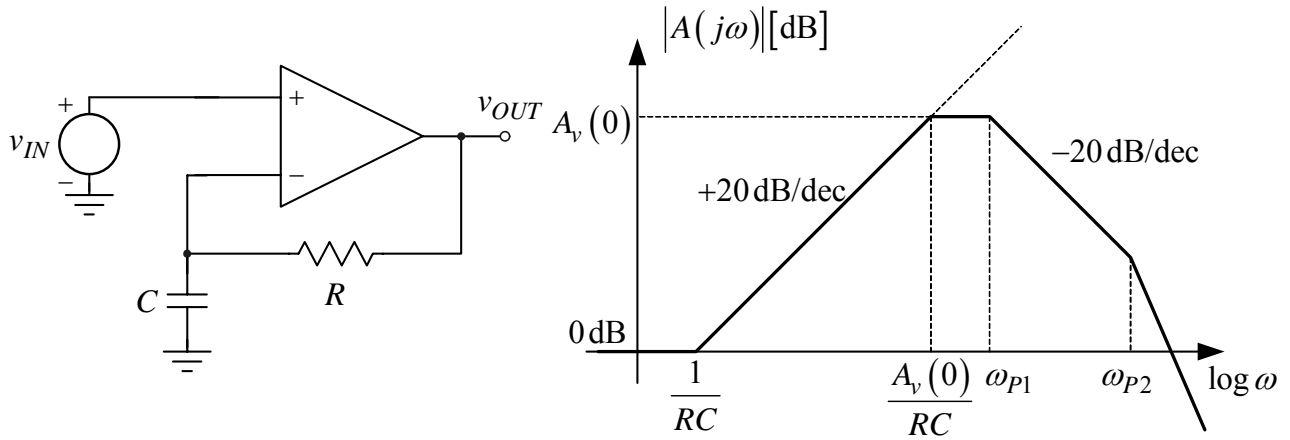
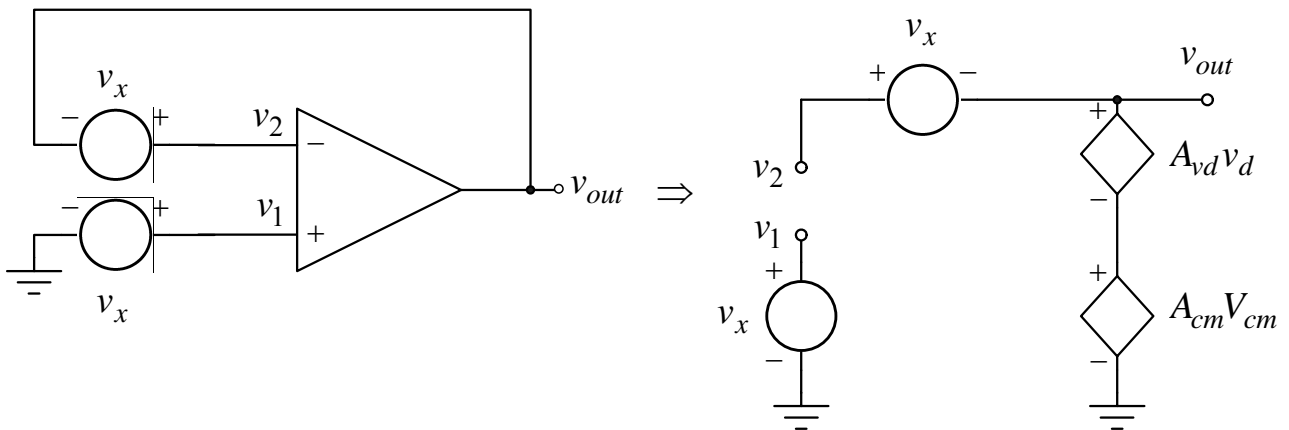


## Snimanje i/ili simulacija frekvencijske karakteristike OPAMP-a



## Simulacija Common Mode Rejection Ratio-a (CMRR)

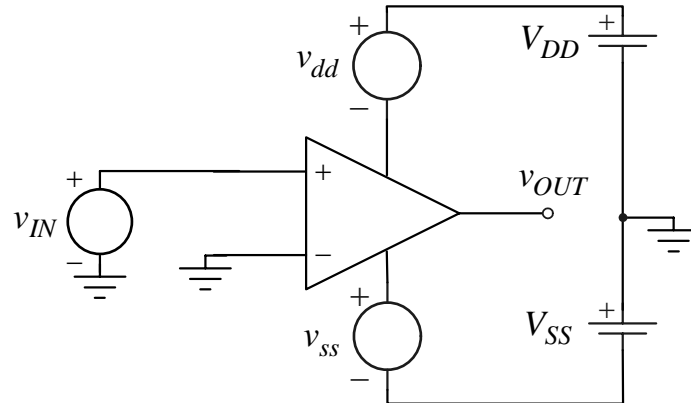


$$v_{cm} = \frac{v_1 + v_2}{2}, v_d = v_1 - v_2, v_2 = v_{out} + v_x, v_1 = v_x \Rightarrow$$

$$v_{out} = A_{vd}(v_1 - v_2) + A_{cm} \frac{v_1 + v_2}{2} = -A_{vd}v_{out} + A_{cm} \left( v_x + \frac{v_{out}}{2} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{v_{out}}{v_x} = \frac{A_{cm}}{1 + A_{vd} - \frac{A_{cm}}{2}} \approx \frac{A_{cm}}{A_{vd}} = \frac{1}{CMRR}.$$

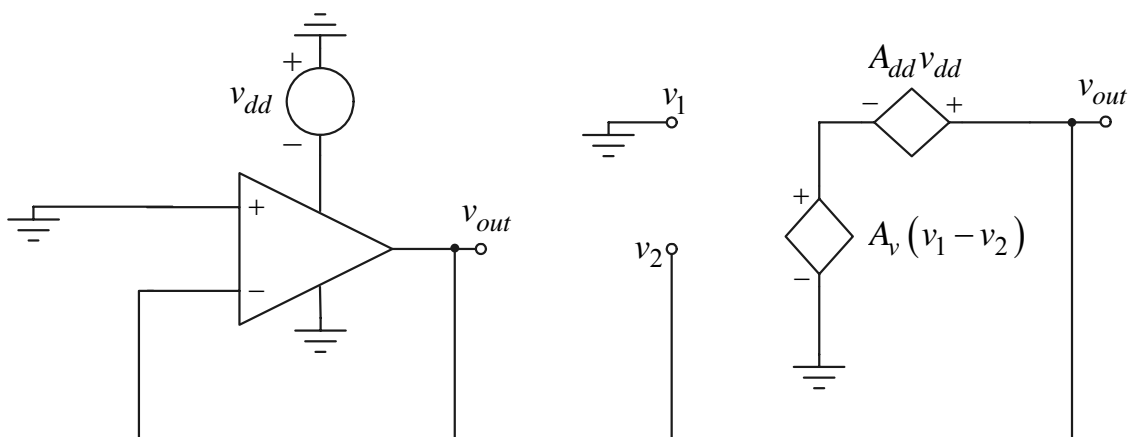
## Power Supply rejection Ratio (PSRR)



$$PSRR^+ = \frac{A_v(v_{dd} = 0)}{A_{dd}(v_{in} = 0)} = \frac{\frac{v_{out}}{v_{in}}(v_{dd} = 0)}{\frac{v_{out}}{v_{dd}}(v_{in} = 0)}, v_{ss} = 0;$$

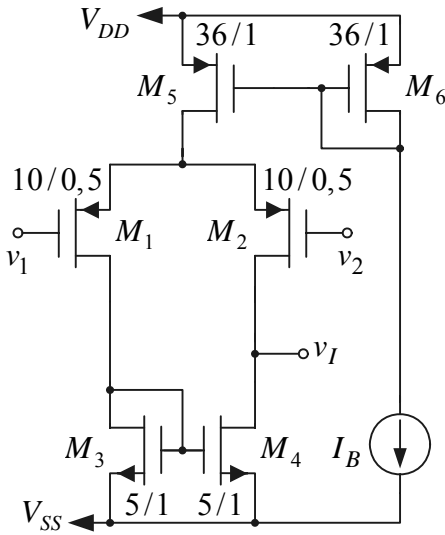
$$PSRR^- = \frac{A_v(v_{ss} = 0)}{A_{ss}(v_{in} = 0)} = \frac{\frac{v_{out}}{v_{in}}(v_{ss} = 0)}{\frac{v_{out}}{v_{ss}}(v_{in} = 0)}, v_{dd} = 0.$$

## Kolo za simulaciju PSRR



$$v_{out} = A_{dd}v_{dd} + A_v(v_1 - v_2) = A_{dd}v_{dd} - A_v v_{out} \Rightarrow$$

$$\frac{v_{out}}{v_{dd}} = \frac{A_{dd}}{1 + A_v} \approx \frac{A_{dd}}{A_v} = \frac{1}{PSRR^+}$$



Slika 6.14d

\*6.14. Parametri tranzistora u kolu pojačavača sa slike 6.14 su:  $V_{TN} = 0,7 \text{ V}$ ,  $V_{TP} = -0,8 \text{ V}$ ,  $\mu_n C_{ox} = 190 \mu\text{A/V}^2$ ,  $\mu_p C_{ox} = 68 \mu\text{A/V}^2$ ,  $\lambda_n = 0,04 \text{ V}^{-1}$  i  $\lambda_p = (0,1/L[\mu\text{m}]) \text{ V}^{-1}$ , dok je  $V_{DD} = -V_{SS} = 2 \text{ V}$  i  $I_B = 50 \mu\text{A}$ . U okolini mirne radne tačke, odrediti faktore potiskivanja promenljivih signala koji potiču od napona napajanja  $v_{dd} \ll V_{DD}$  i  $v_{ss} \ll V_{SS}$ ,  $PSRR^+ = a_d / a_{dd}$  i  $PSRR^- = a_d / a_{ss}$ ,  $a_d = v_i / v_d|_{v_{ss}=0, v_{dd}=0}$ ,  $v_d = v_1 - v_2$ ,  $a_{dd} = v_i / v_{dd}|_{v_{ss}=0, v_d=0}$  i  $a_{ss} = v_i / v_{ss}|_{v_{dd}=0, v_d=0}$ .

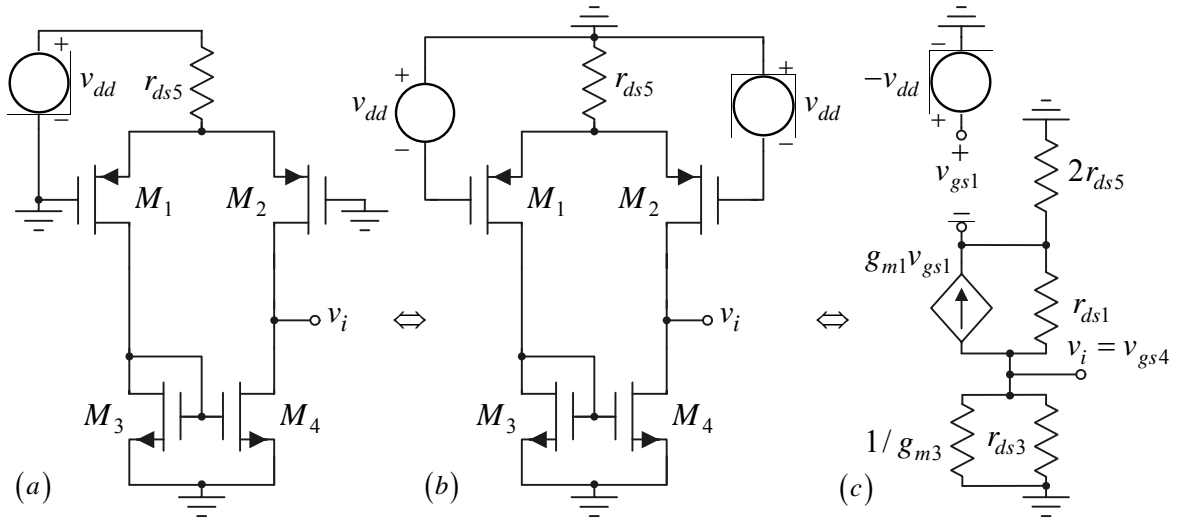
### Rešenje:

Diferencijalno pojačanje je

$$a_d = \frac{v_i}{v_d} \bigg|_{v_{dd}=0, v_{ss}=0} \approx \frac{g_{m1,2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{\sqrt{2I_{D1,2}\mu_p C_{ox}(W/L)_{1,2}}}{\lambda_2 I_{D2} + \lambda_n I_{D4}},$$

$$\lambda_2 = (0,1/0,5) \text{ V}^{-1} = 0,2 \text{ V}^{-1} \Rightarrow a_d \approx \frac{\sqrt{I_B \mu_p C_{ox}(W/L)_{1,2}}}{(\lambda_2 + \lambda_n) I_B / 2} = 43,5.$$

Na slici 6.14a je prikazana šema pojačavača za male signale kada na ulazu deluje samo generator  $v_{dd}$ , koji potiče od promenljivog napona u naponu napajanja  $V_{DD}$ .



Slika 6.14

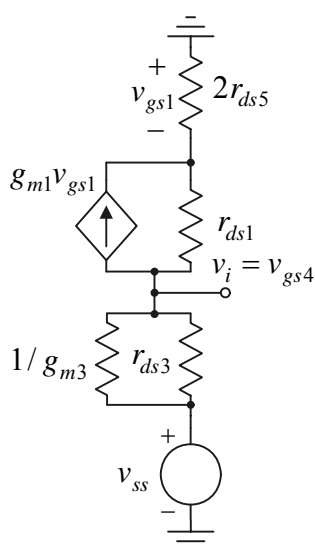
Promenom položaja generatora  $v_{dd}$  dobijeno je ekvivalentno kolo pokazano na slici 6.14b. U novom kolu naponski generator deluje simetrično na oba gejtja diferencijalnog para tranzistora  $M_1 - M_2$ , što je ekvivalentno delovanju napona srednje vrednosti  $v_s = -v_{dd}$  na ulazu pojačavača. Pri ovakvoj pobudi kolo pojačavača je simetrično, pa se može primeniti bisekciona teorema, slika 6.14c. Prema ovoj slici je

$$v_i (g_{ds3} + g_{m3}) + g_{m1} (-v_{dd} - v_{s1}) + g_{ds1} (v_i - v_{s1}) = 0 \text{ i } v_{s1} = -2r_{ds5} v_i (g_{ds3} + g_{m3}) \Rightarrow$$

$$v_i = \frac{g_{m1} v_{dd}}{(g_{ds3} + g_{m3})(1 + 2r_{ds5}(g_{m1} + g_{ds1})) + g_{ds1}} \approx \frac{v_{dd}}{2g_{m3} r_{ds5}} \Rightarrow$$

$$a_{dd} = \frac{v_i}{v_{dd}} \approx \frac{1}{2g_{m3} r_{ds5}} = \frac{\lambda_5 I_B}{2\sqrt{I_B \mu_n C_{ox}(W/L)_3}} = 11,5 \cdot 10^{-3}, \lambda_5 = (0,1/1) \text{ V}^{-1} = 0,1 \text{ V}^{-1} \Rightarrow$$

$$PSRR^+ = a_d / a_{dd} = 3,79 \cdot 10^3 \Rightarrow PSRR^+ [\text{dB}] = 20 \log PSRR^+ = 71,6 \text{ dB}.$$



Kada je  $v_1 = v_2 = 0$  i  $v_{dd} = 0$ , a deluje samo generator  $v_{ss}$ , kolo i dalje ostaje simetrično, slika 6.14d. Ovo znači da je

$$v_i \approx \frac{R_{d1}}{R_{d1} + 1/g_{m3}} v_{ss}, \quad R_{d1} \approx 2r_{ds5}g_{m1}r_{ds1} \gg 1/g_{m3} \Rightarrow v_i \approx v_{ss} \Rightarrow$$

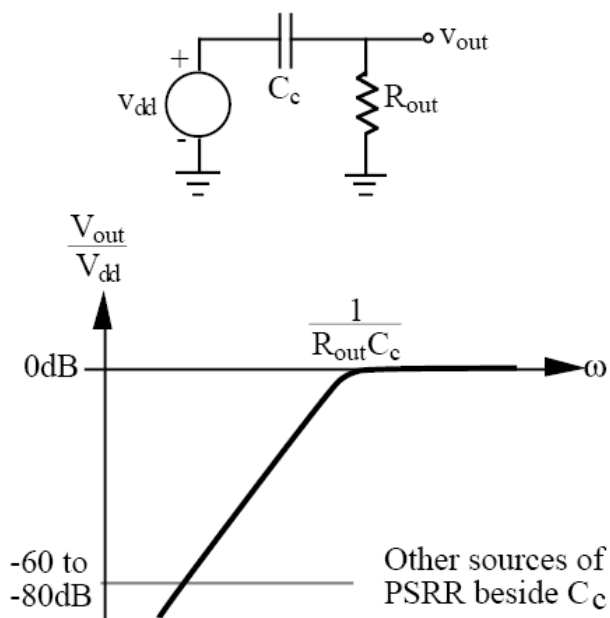
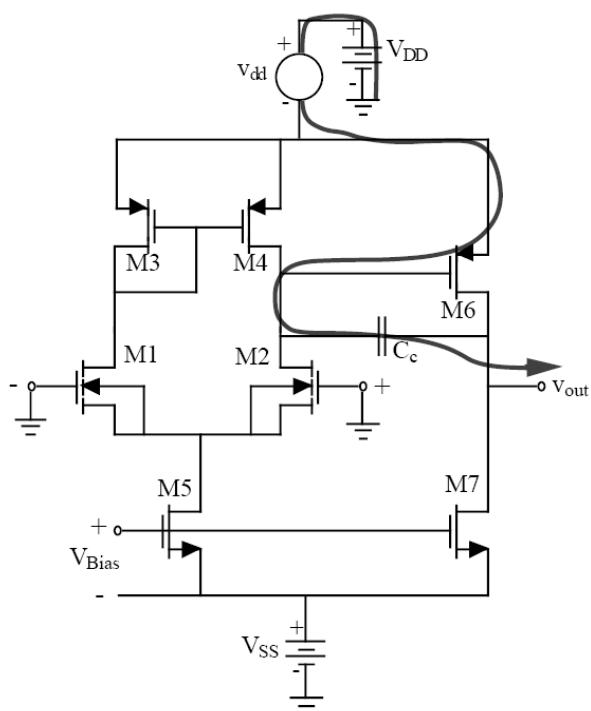
$$a_{ss} = v_i / v_{ss} = 1 \Rightarrow PSRR^- = a_d / a_{ss} = 43,5 \Rightarrow$$

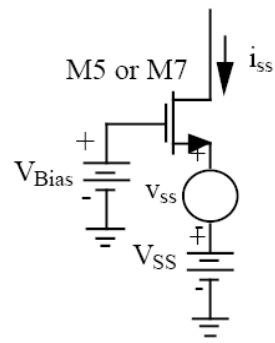
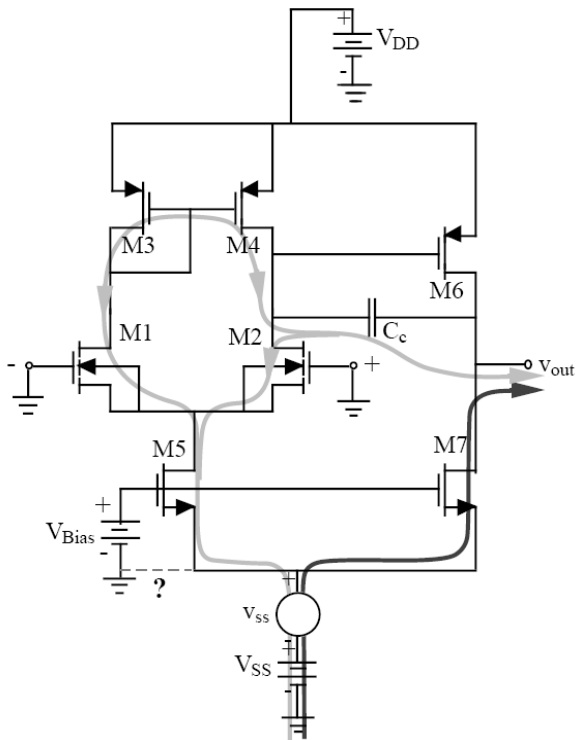
$$PSRR^- [\text{dB}] = 20 \log PSRR^- = 32,8 \text{ dB}.$$

Slika 6.14d

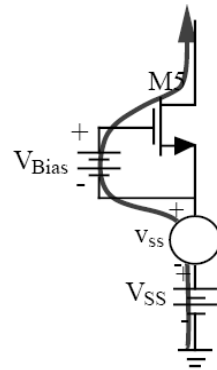
## Dvostepeni CMOS pojačavač

### Miller Compensation





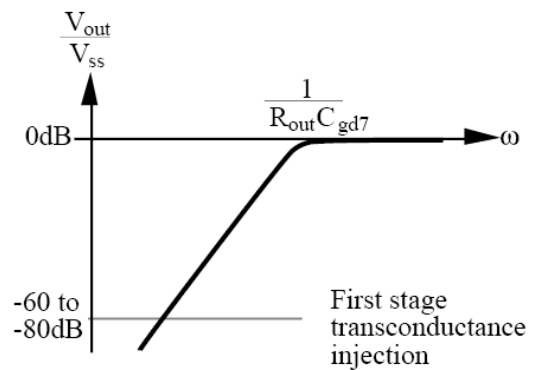
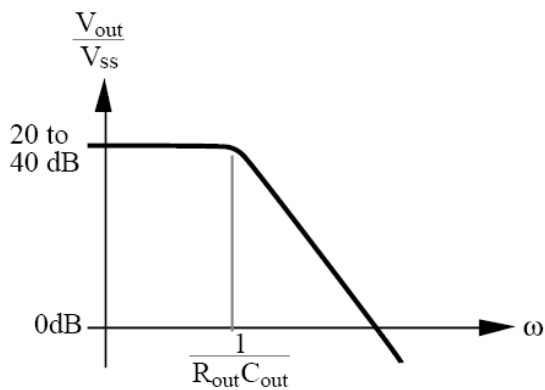
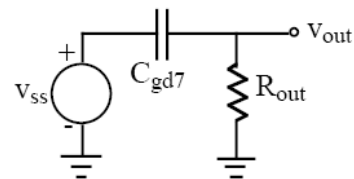
Transimpedansni



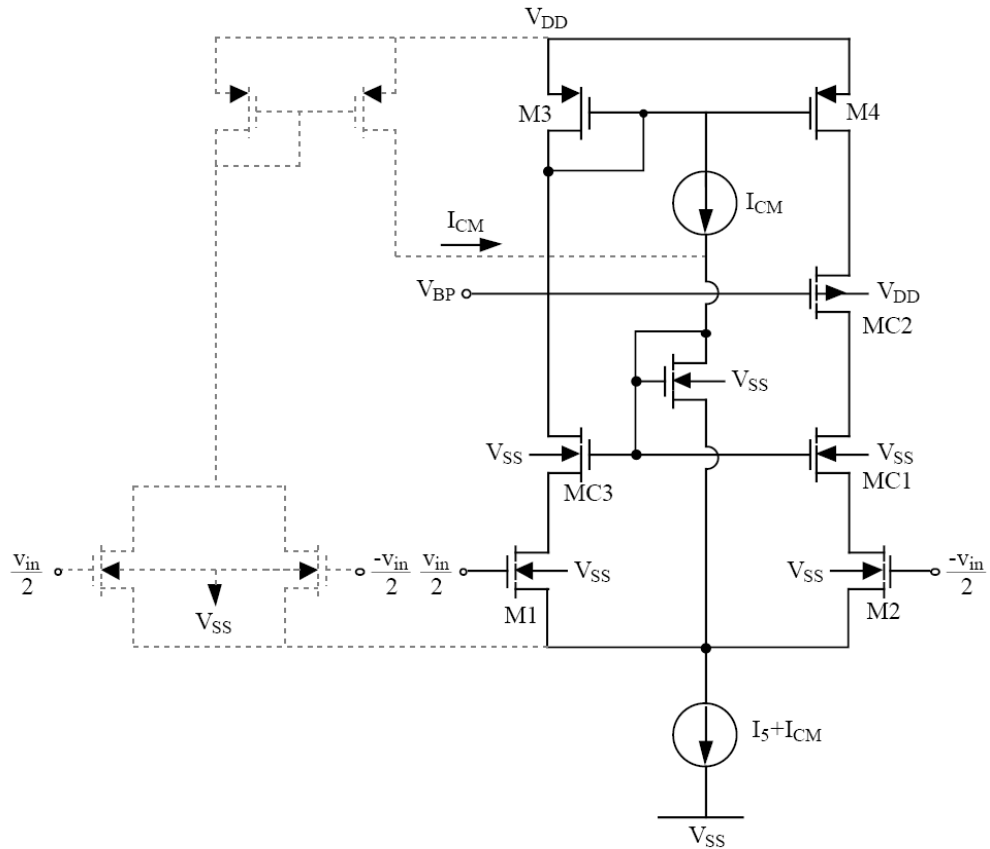
Kapacitivni

Transimpedansni

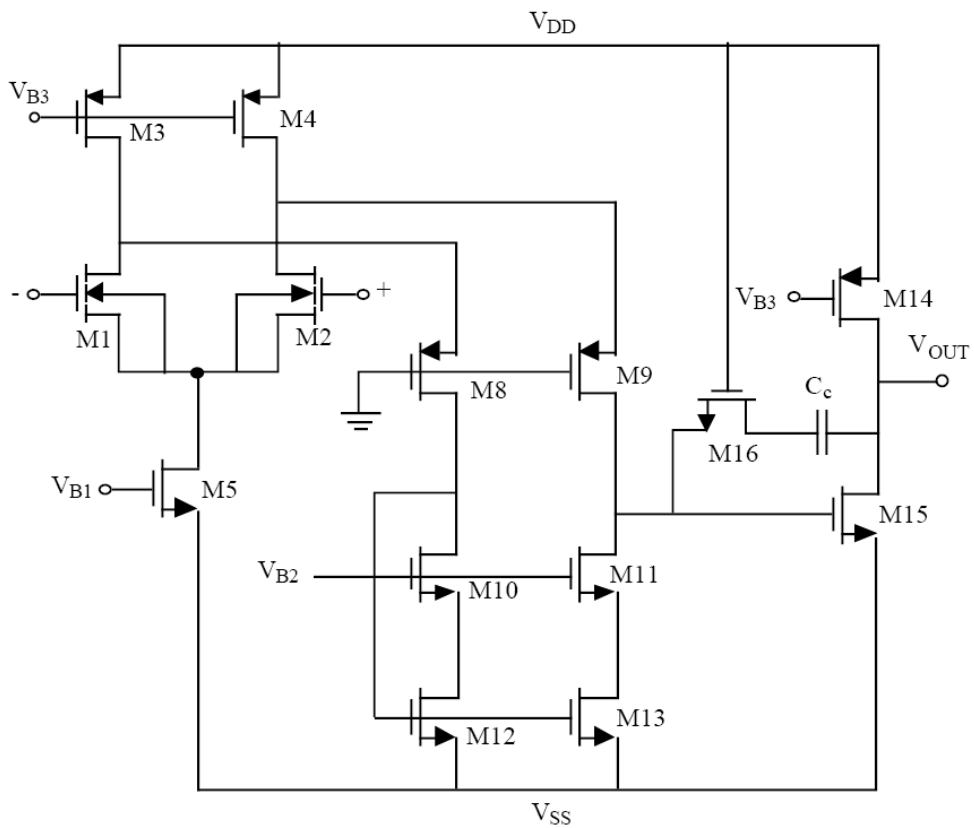
$$\frac{V_{out}}{V_{ss}} = g_{m7} R_{out}$$


 Problem kod dvostepenog CMOS pojačavača: loš *PSRR*.

# Telescopic Cascode

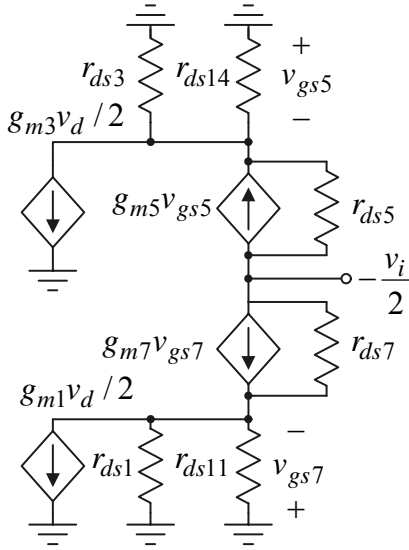


# Folded Cascode OPAMP



$GB \approx 10 \text{ MHz}$ ,  $A_{VDC} \approx 100 \text{ dB}$





Slika 7.29a

$$a_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i/2}{v_d/2} \quad \text{i}$$

$$a_d = g_{m3} \frac{r_{ds3} \parallel r_{ds14}}{(r_{ds3} \parallel r_{ds14}) + \frac{r_{ds5} + R_{d7}}{1 + g_{m5}r_{ds5}}} + g_{m1} \frac{r_{ds1} \parallel r_{ds11}}{(r_{ds1} \parallel r_{ds11}) + \frac{r_{ds7} + R_{d5}}{1 + g_{m7}r_{ds7}}},$$

gde su  $R_{d7}$  i  $R_{d5}$  otpornosti koje se vide iz drejna tranzistora  $M_7$  i  $M_5$ :

$$R_{d7} \approx g_{m7}r_{ds7}(r_{ds1} \parallel r_{ds11}) = 35,6 \text{ M}\Omega \quad \text{i}$$

$$R_{d5} \approx g_{m5}r_{ds5}(r_{ds3} \parallel r_{ds14}) = 25,2 \text{ M}\Omega.$$

Smenom brojnih vrednosti dobija se naponsko pojačanje

$$a_d = 8,52 \cdot 10^3.$$

c) Diferencijalno pojačanje od ulaza do drejna diferencijalnog para  $M_3 - M_4$  približno je

$$a_{d3} = \frac{v_{d3}}{v_d} \approx -\frac{1}{2} g_{m3} \left( r_{ds14} \parallel r_{ds3} \parallel \frac{r_{ds5} + R_{d7}}{1 + g_{m5}r_{ds5}} \right) \approx -15,5.$$

Slično je i pojačanje od ulaza do drejna diferencijalnog para  $M_1 - M_2$ , što znači da je, zbog velikog diferencijalnog pojačanja od ulaza do izlaza, mala varijacija napona na drejnu ovih tranzistora. Zato se, izborom napona  $V_{GG1}$  i  $V_{GG2}$ , mirna radna tačka tranzistora u strujnom ogledalu  $M_{13} - M_{14}$  i  $M_{11} - M_{12}$  može postaviti na granicu triodne oblasti i zasićenja. Ovim se dobija najveći opseg izlaznog napona u kojem su svi tranzistori u zasićenju.

Tada je

$$V_{GG1} = V_{SS} + \sqrt{2I_{D11,12}/B_{11,12}} + V_T + \sqrt{2I_{D7,8}/B_{7,8}} \Rightarrow$$

$$V_{GG1} = V_{SS} + \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{11,12}}} + V_T + \sqrt{\frac{I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{7,8}}} = -1,26 \text{ V},$$

odnosno

$$V_{GG2} = V_{DD} - \sqrt{2I_{D13,14}/B_{13,14}} - V_T - \sqrt{2I_{D5,6}/B_{5,6}} \Rightarrow$$

$$V_{GG2} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_p C_{ox} (W/L)_{13,14}}} - V_T - \sqrt{\frac{I_B}{\mu_p C_{ox} (W/L)_{5,6}}} = 1,23 \text{ V}.$$

Maksimalna vrednost izlaznog napona  $v_{I\max}$ , za koju svi tranzistori rade u zasićenju, određena je ulaskom tranzistora  $M_6$  ili  $M_7$  u triodnu oblast, dok je minimalna vrednost ovog napona određena ulaskom tranzistora  $M_5$  ili  $M_8$ . Zbog asimetrije parametara PMOS i NMOS tranzistora, naponi na drejnu tranzistora  $M_5$  i  $M_6$  u mirnoj radnoj tački različiti su od nule.

d) Kada napon  $V$  postane

$$V \geq V_X = V_{DD} - \sqrt{2I_{D15}/B_{15}} - V_T - \sqrt{2I_{D1,2}/B_{1,2}} = 1,23 \text{ V},$$

tranzistor  $M_{15}$  ući će u triodnu oblast. Sa daljim povećanjem napona  $V$  struja diferencijalnog para tranzistora  $M_1 - M_2$  se smanjuje, ali su oni i dalje u pojačavačkom režimu. Kada postane

$$V \geq V_X = V_{DD} - V_T = 2,3 \text{ V},$$

zakočiće se diferencijalni par  $M_1 - M_2$ . Međutim, tada diferencijalni napon sa ulaza pojačava diferencijalni par  $M_3 - M_4$ . Maksimalna vrednost napona  $V$ , za koju nijedan od ulaznih tranzistor ne radi u triodnoj oblasti, određena je ulaskom tranzistora  $M_3$  i  $M_4$  u triodnu oblast. Tada je

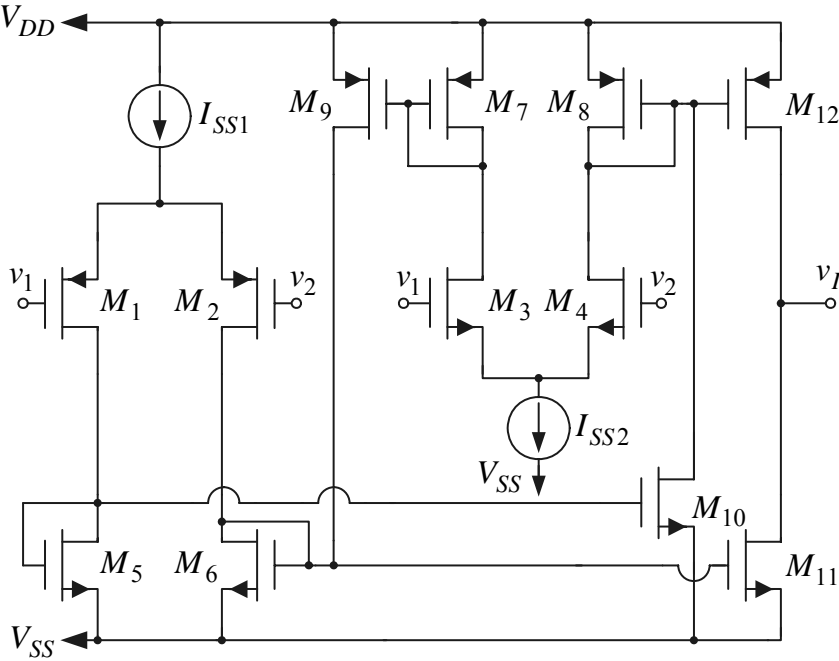


$$V_{\max} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_p C_{ox} (W/L)_{13,14}}} - v_{DG3,4\min} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_p C_{ox} (W/L)_{13,14}}} + V_T = 2,92 \text{ V}.$$

Kolo se simetrično ponaša kada se napon  $V$  smanjuje. Minimalna vrednost napona  $V$ , za koju nijedan od ulaznih tranzistora ne radi u triodnoj oblasti, određena je ulaskom tranzistora  $M_1$  i  $M_2$  u triodnu oblast. Tada je

$$V_{\min} = V_{SS} + \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{11,12}}} - v_{DG1,2\max} = V_{SS} + \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{11,12}}} - V_T = -2,93 \text{ V}.$$

**\*7.30.** U CMOS pojačavaču sa slike 7.30 upotrebljeni su tranzistori čiji su parametri  $V_{TN} = -V_{TP} = V_T = 0,7 \text{ V}$ ,  $B = \mu_n C_{ox} (W/L)_N = \mu_p C_{ox} (W/L)_P = 200 \mu\text{A/V}^2$ ,  $\lambda_n = 0,04 \text{ V}^{-1}$  i  $\lambda_p = 0,05 \text{ V}^{-1}$ . Strujni izvori  $I_{SS1} = I_{SS2} = I_{SS} = 8 \mu\text{A}$  realizovani su kao prosta strujna ogledala, dok



Slika 7.30

je  $V_{DD} = -V_{SS} = 2,5 \text{ V}$ .

- Ako je  $V_1 = V_2 = 0$ , odrediti struje drena svih tranzistora i diferencijalno pojačanje  $a_d = v_i / v_d$ ,  $v_d = v_2 - v_1$  u okolini mirne radne tačke.
- Ponoviti tačku a) kada je  $V_1 = V_2 = 2 \text{ V}$ .
- Ponoviti tačku a) kada je  $V_1 = V_2 = -2 \text{ V}$ .
- Ako je  $v_1 = v_2 = V$ , odrediti opseg vrednosti napona  $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$  u kojem nijedan od tranzistora  $M_{1-4}$  ne radi u triodnoj oblasti.

### Rešenje:

a) U mirnoj radnoj tački je

$$\begin{aligned} V_1 = V_2 = 0 &\Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_{SS1} / 2 = I_{SS} / 2 = 4 \mu\text{A} \Rightarrow I_{D10} = I_{D5} = I_{D1} = I_{SS} / 2 = 4 \mu\text{A}, \\ I_{D3} = I_{D4} = I_{SS2} / 2 = I_{SS} / 2 = 4 \mu\text{A} &\Rightarrow I_{D9} = I_{D7} = I_{D3} = I_{SS} / 2 = 4 \mu\text{A} \Rightarrow \\ I_{D6} = I_{D9} + I_{D2} = I_{SS} = 8 \mu\text{A}, &I_{D8} = I_{D4} + I_{D10} = I_{SS} = 8 \mu\text{A} \Rightarrow \\ I_{D12} = I_{D8} = I_{SS} = 8 \mu\text{A} &\text{ i } I_{D12} = I_{D11} = I_{D6} = I_{SS} = 8 \mu\text{A}. \end{aligned}$$

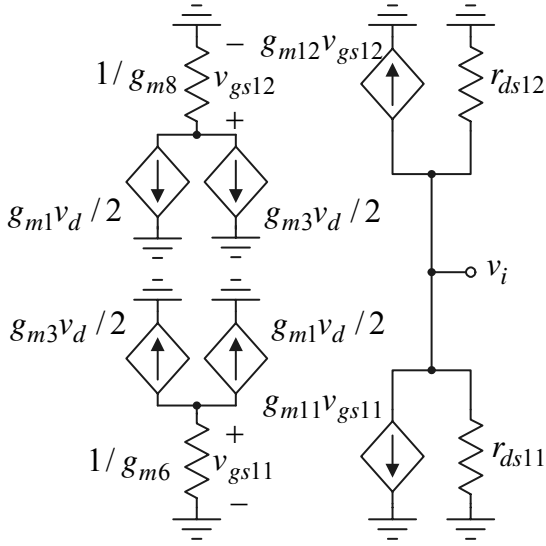
Kolo je simetrično, a posle primene bisekcione teoreme pri diferencijalnoj pobudi dobija se uprošćena šema za male signale pokazana na slici 7.30a. Šema je dobijena koristeći aproksimacije

$$g_{m8} + g_{ds8} + g_{ds4} + g_{ds10} \approx g_{m8} \text{ i } g_{m6} + g_{ds6} + g_{ds2} + g_{ds9} \approx g_{m6}.$$

Parametri u modelu tranzistora za male signale su:

$$\begin{aligned} g_{m1-4} &= \sqrt{I_{SS} B} = 40 \mu\text{S}, \quad g_{m6} = g_{m11} = g_{m8} = g_{m12}, \\ r_{ds12} &= \frac{1}{\lambda_p I_{D12}} = \frac{1}{\lambda_p I_{SS}} = 2,5 \text{ M}\Omega \text{ i } r_{ds11} = \frac{1}{\lambda_n I_{D11}} = \frac{1}{\lambda_n I_{SS}} = 3,13 \text{ M}\Omega. \end{aligned}$$

Prema slici 7.30a je:



Slika 7.30a

Diferencijalno pojačanje dobija se na osnovu iste šeme za male signale kao u prethodnoj tački, slika 7.30a, s tim što je sada:

$$g_{m1} = 0, \quad g_{m3} = g_{m4} = \sqrt{I_{SS}B} = 40\mu\text{S}, \quad r_{ds12} = \frac{1}{\lambda_p I_{D12}} = \frac{2}{\lambda_p I_{SS}} \quad \text{i}$$

$$r_{ds11} = \frac{1}{\lambda_n I_{D11}} = \frac{2}{\lambda_n I_{SS}} \Rightarrow a_d = \frac{v_i}{v_d} = g_{m3}(r_{ds11} \parallel r_{ds12}) = \frac{g_{m3}}{(\lambda_p + \lambda_n)I_{SS}/2} = \frac{2\sqrt{I_{SS}B}}{(\lambda_p + \lambda_n)I_{SS}} = 111.$$

c) Kada je  $V_1 = V_2 = -2\text{V}$ , zakočeni su tranzistori  $M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_7$  i  $M_9$ , a tranzistor u strujnom izvoru  $I_{SS2}$  je u triodnoj oblasti. Tada je

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{SS}/2 = 4\mu\text{A} \Rightarrow I_{D12} = I_{D8} = I_{D10} = I_{D5} = I_{D1} = I_{SS}/2 = 4\mu\text{A} \quad \text{i}$$

$$I_{D11} = I_{D6} = I_{D2} = I_{SS}/2 = 4\mu\text{A}.$$

Diferencijalno pojačanje dobija se na osnovu šeme za male signale sa slike 7.30a. Sada je:

$$g_{m3} = 0, \quad g_{m1} = g_{m2} = \sqrt{I_{SS}B} = 40\mu\text{S}, \quad r_{ds12} = \frac{1}{\lambda_p I_{D12}} = \frac{2}{\lambda_p I_{SS}} \quad \text{i}$$

$$r_{ds11} = \frac{1}{\lambda_n I_{D11}} = \frac{2}{\lambda_n I_{SS}} \Rightarrow a_d = \frac{v_i}{v_d} = g_{m1}(r_{ds11} \parallel r_{ds12}) = \frac{g_{m1}}{(\lambda_p + \lambda_n)I_{SS}/2} = \frac{2\sqrt{I_{SS}B}}{(\lambda_p + \lambda_n)I_{SS}} = 111.$$

Prema tome, za sva tri napona  $v_1 = v_2 = V$  u mirnoj radnoj tački diferencijalno pojačanje pojačavača ima konstantnu vrednost.

d) U okolini  $v_1 = v_2 = 0$  oba diferencijalna para provode struju. Kada postane

$$V = V_G = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_{SS1}}{B_{SS1}}} - V_{GS1,2} = V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_{SS1}}{B_{SS1}}} - V_T - \sqrt{\frac{I_{SS}}{B}},$$

gornji strujni izvor ulazi u triodnu oblast. Sa daljim povećanjem napona  $V$  smanjuje se struja PMOS diferencijalnog para. On i dalje radi kao pojačavač, ali sa smanjenim diferencijalnim pojačanjem. Ovo pojačanje se smanjuje do nule, kada se zakoče tranzistori  $M_1$  i  $M_2$ . Tada je

$$V = V_{G1} = V_{DD} - V_T = 1,8\text{V},$$

a kolo radi kao pojačavač zahvaljujući diferencijalnom paru  $M_3 - M_4$ .

Kada postane

$$V = V_{\max} = V_{DD} + V_{GS7,8} - v_{DG3,4\min} \Rightarrow V_{\max} = V_{DD} - V_T - \sqrt{\frac{2I_{SS}/2}{B}} + V_T = V_{DD} - \sqrt{\frac{I_{SS}}{B}} = 2,3\text{V},$$

tranzistori  $M_3$  i  $M_4$  ulaze u triodnu oblast, a kolo prestaje da radi kao pojačavač sa konstantnim diferencijalnim pojačanjem.

Slično se dešava i kada se smanjuje napon  $V$ . Kolo je simetrično, a tranzistori  $M_1$  i  $M_2$  ulaze u triodnu oblast kada je

$$V_{\min} = V_{SS} + V_{GS5,6} - v_{DG1,2\max} \Rightarrow V_{\min} = V_{SS} + V_T + \sqrt{\frac{2I_{SS}/2}{B}} - V_T = V_{SS} + \sqrt{\frac{I_{SS}}{B}} = -2,3 \text{ V}.$$