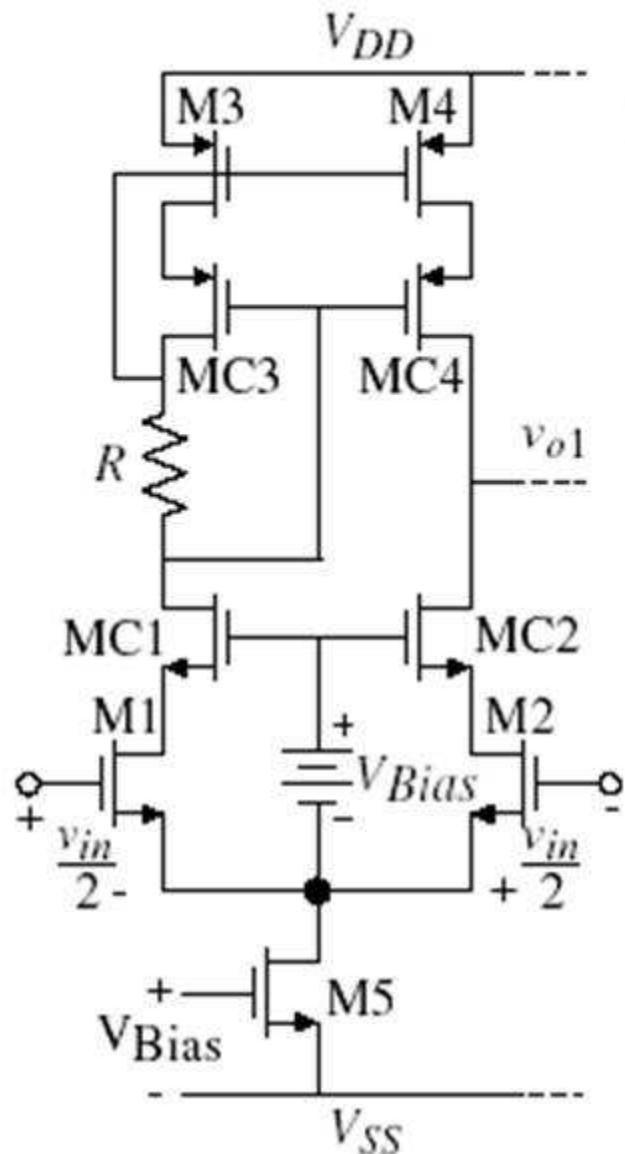


Kompenzacija višestepenih (operacionih) pojačavača [1/9]

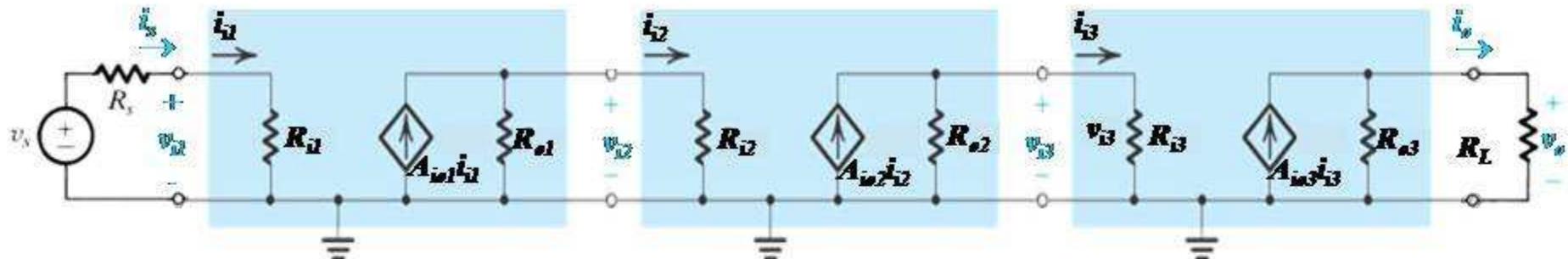
Kada je napon napajanja dovoljno veliki, potrebna velika vrednost pojačanja na niskim učestanostima može da se postigne višestrukim kaskodiranjem (telescopic – cascode op amp). Ulazni diferencijalni stepen ovakvog pojačavača (uprošćena šema) →

Velika izlazna otpornost prikazanog ulaznog stepena i ulazna kapacitivnost izlaznog stepena (u tački v_{o1} na slici) formiraju dominantan pol.

Ovo ne može da se primeni ako je napon napajanja $\sim 2V$.



Trostepeni pojačavač predstavljen kaskadnom vezom tri strujna pojačavača:



$$A_{vuk} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{i_{il}}{v_s} \cdot A_{io1} \cdot \frac{i_{i2}}{A_{io1} i_{il}} \cdot A_{io2} \cdot \frac{i_{i3}}{A_{io2} i_{i2}} \cdot A_{io3} \cdot \frac{v_o}{A_{io3} i_{i3}}$$

$$A_{vuk} = \frac{1}{R_s + R_{il}} \cdot A_{io1} \cdot \frac{R_{o1}}{R_{o1} + R_{i2}} \cdot A_{io2} \cdot \frac{R_{o2}}{R_{o2} + R_{i3}} \cdot A_{io3} \cdot \frac{R_{o3} R_L}{R_{o3} + R_L}$$

Ako su pojačavački stepeni sa ZB, $A_{io1} = A_{io2} = A_{io3} = \alpha$ (≈ 1), pa je

$$A_{vuk} \approx \frac{\alpha^3}{R_s + R_{il}} \cdot \frac{R_{o1}}{R_{o1} + R_{i2}} \cdot \frac{R_{o2}}{R_{o2} + R_{i3}} \cdot \frac{R_{o3} R_L}{R_{o3} + R_L}.$$

Zbog male ulazne otpornosti stepena sa ZB ($R_{i1} \approx R_{i2} \approx R_{i3} \approx 1/g_m$):

$$R_{o1} \gg R_{i2}, R_{o2} \gg R_{i3} \Rightarrow A_{vuk} = \frac{\alpha^3}{R_s + R_{il}} \cdot \frac{R_{o3}R_L}{R_{o3} + R_L}.$$

Ako je $R_{o3} \gg R_L$ pojačanje je isto kao kod jednostepenog pojačavača

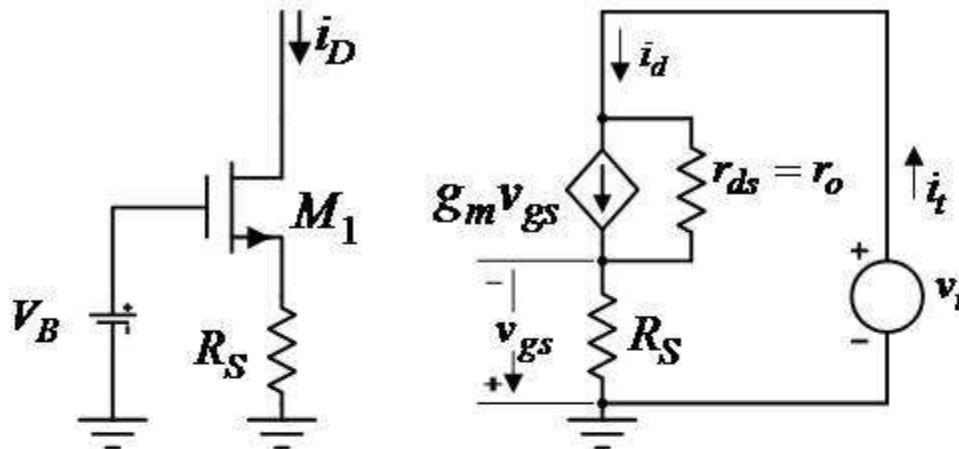
$$A_{vuk} = \frac{\alpha^3}{R_s + R_{il}} \cdot R_L = \frac{R_L}{R_s + R_{il}}. \text{ Međutim, ako } \frac{R_{o3}R_L}{R_{o3} + R_L} \rightarrow \infty \Rightarrow A_{vuk} \rightarrow \infty$$

Povećanje $\frac{R_{o3}R_L}{R_{o3} + R_L}$ se postiže kaskodnom realizacijom aktivnog opterećenja (R_L) i kaskodnim vezivanjem pojačavačkih stepena umesto kaskadnog.

Kaskadno vezani pojačavački stepeni imaju zasebne konture kolektorske struje iz naponskog izvora, što smanjuje izlaznu otpornost stepena.

Kaskodno vezani pojačavački stepeni (jedan iznad drugog) imaju zajedničku konturu kolektorske struje iz naponskog izvora, što omogućava veću izlaznu otpornost svakog stepena u poređenju sa prethodnim.

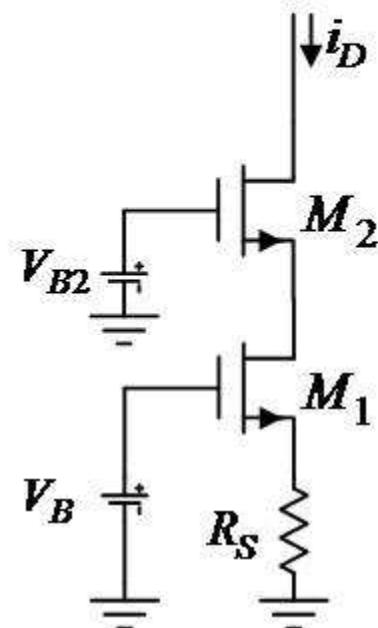
Isto važi za MOS pojačavačke stepene sa ZG.



$$(1 + g_m r_{ds}) R_S = \left\{ \begin{array}{l} r_{ds} = r_o \\ \text{---} \\ g_m r_{ds} v_{gs} \\ \text{---} \\ v_{gs} \\ \text{---} \\ R_S \end{array} \right. \quad \Rightarrow \quad R_{izl} = \frac{v_t}{i_t} =$$

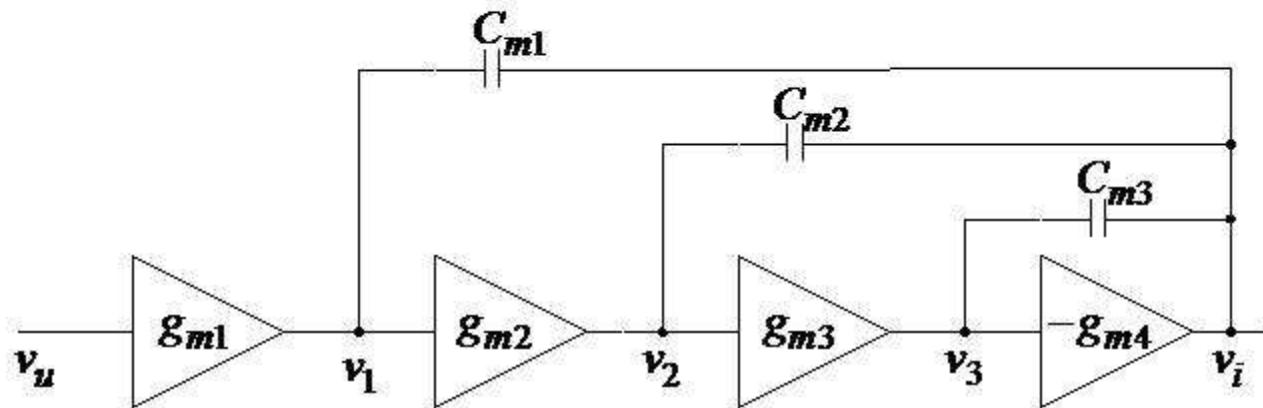
$$= r_{ds} + (1 + g_m r_{ds}) R_S$$

$$= R_S + r_{ds} (1 + g_m R_S)$$



Izlazna otpornost strujnog izvora realizovanog stepenom sa zajedničkim gejtom. Iz izraza se vidi da je vrednost izlazne otpornosti moguće dalje uvećavati ako se otpornost u sorsu narednog stepena sa zajedničkim gejtom zameni izlaznom otpornošću prethodnog stepena, kao što je prikazano na slici desno.

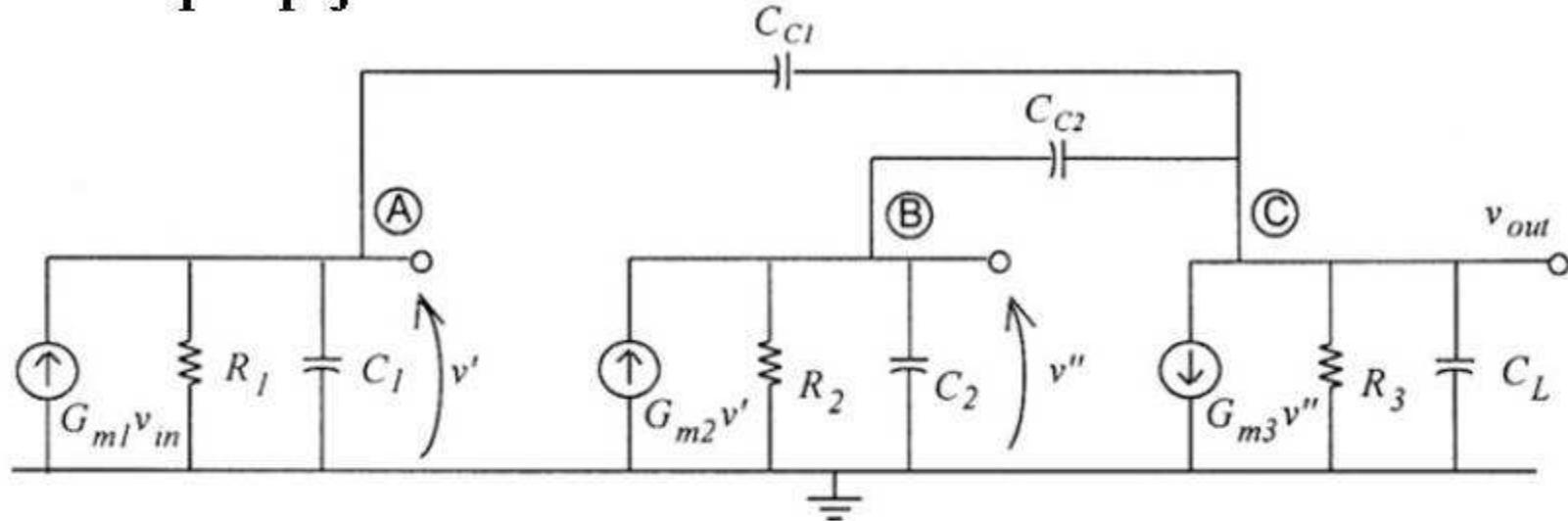
Kada je napon napajanja mali, veliko pojačanje na niskim učestanostima dobija se kaskadnim vezivanjem 3-4 pojačavačka stepena. Kompenzovanje ovakvih pojačavača je komplikovano. Kada je samo poslednji stepen invertujući, često se koristi ugnježđena Millerova kompenzacija (višestruko primenjeno razdvajanje polova):



Mane:

1. Veliko kapacitivno opterećenje izlaznog stepena
2. Nule u desnoj poluravni na relativno niskim učestanostima
3. Značajno sužavanje propusnog opsega
3. Komplikovano projektovanje

Za trostepeni pojačavač



pojačanje je približno

$$A(s) = A_o \frac{1 - \frac{C_{C2}}{G_{m3}} s - \frac{C_{C1}C_{C2}}{G_{m2}G_{m3}} s^2}{\left(1 + \frac{s}{p_1}\right) \left[1 + \left(\frac{1}{G_{m2}} - \frac{1}{G_{m3}}\right) C_{C2}s + \frac{C_{C2}C_L}{G_{m2}G_{m3}} s^2\right]}$$

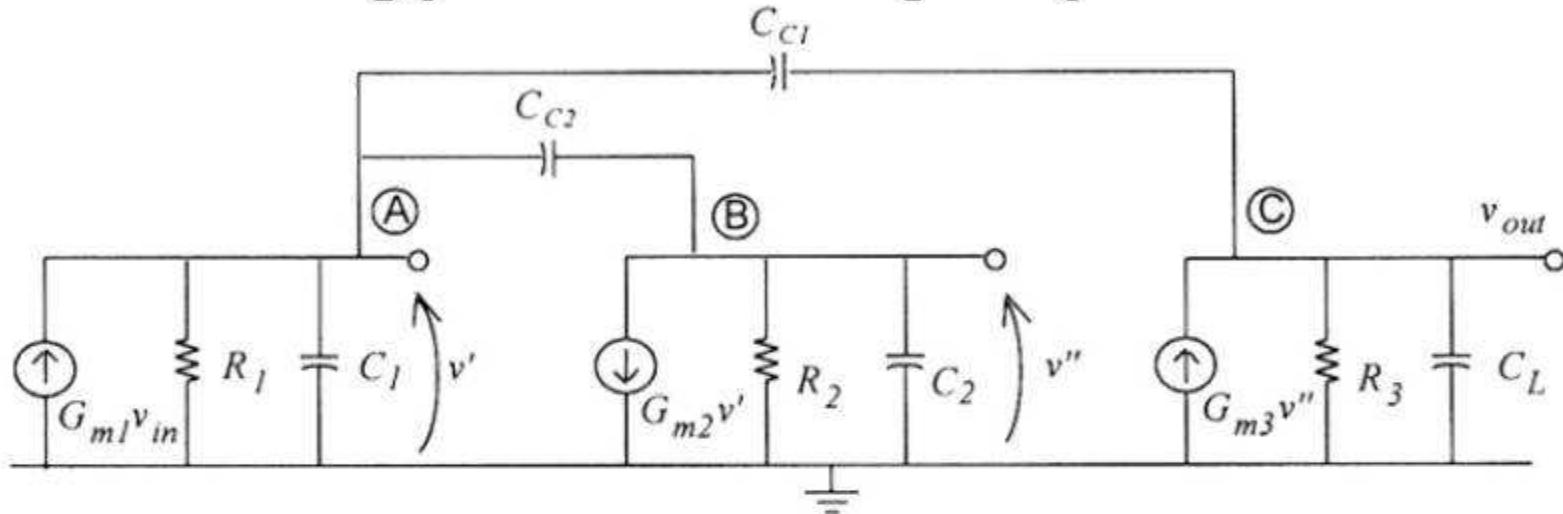
$$A_o = G_{m1} G_{m2} G_{m3} R_1 R_2 R_3$$

$$p_1 \approx \frac{1}{R_1 G_{m2} R_2 G_{m3} R_3 C_{C1}}$$

$$\omega_{GBW} = \frac{G_{m1}}{C_{C1}}$$

Dve nule, manja je u desnoj poluravni. Eliminacija nule u desnoj poluravni se vrši istim metodama kao kod dvostepenog pojačavača.

Koristi se i inverzna ugnježdena Milerova kompenzacija:



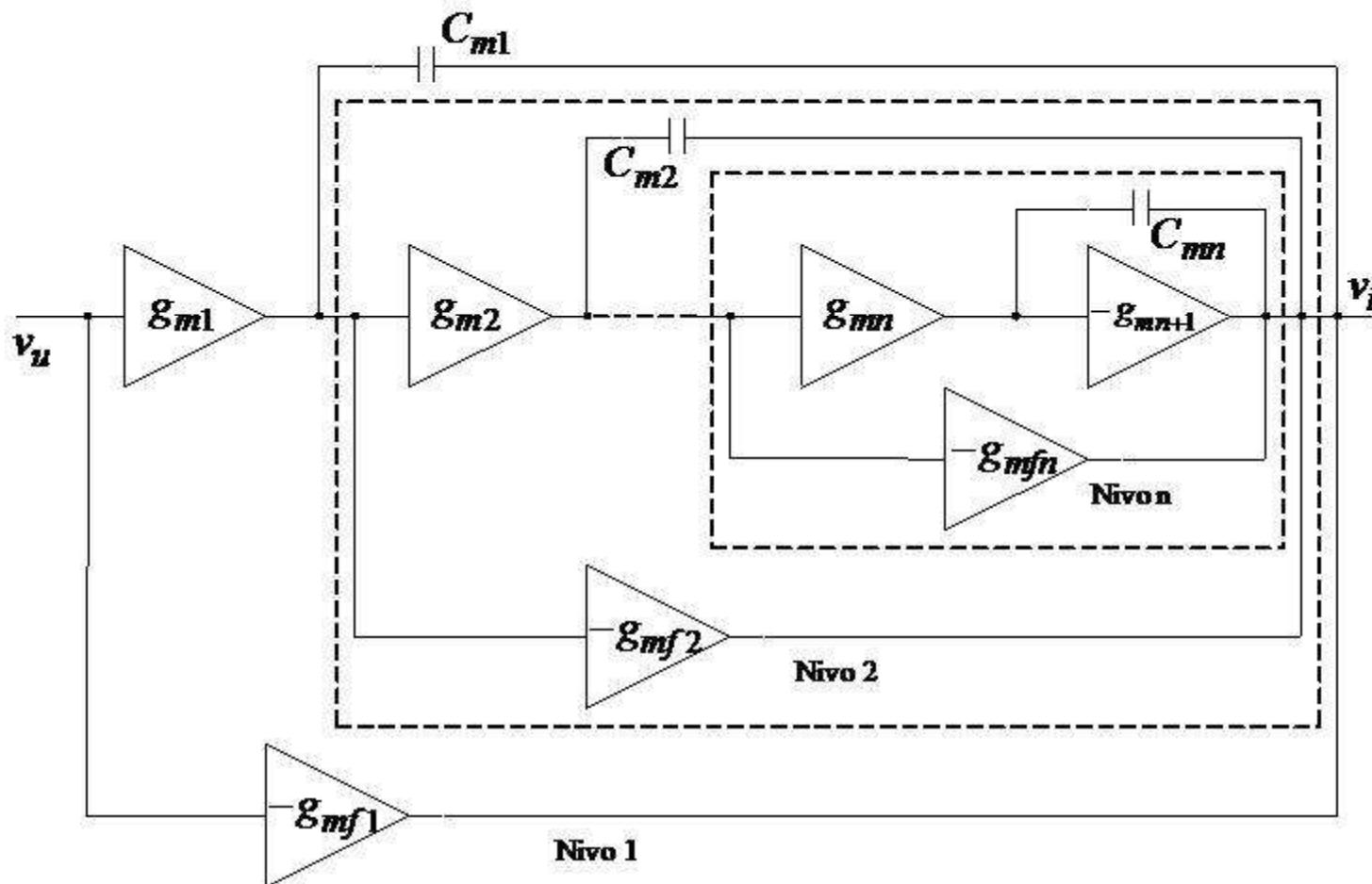
pojačanje je približno

$$A(s) = A_o \frac{1 - \left(\frac{C_{C2}}{G_{m2}} + \frac{C_{C1}}{G_{m2}G_{m3}R_2} \right)s - \frac{C_{C1}C_{C2}}{G_{m2}G_{m3}}s^2}{\left(1 + \frac{s}{p_1} \right) \left[1 + \left(\frac{C_{C2}C_L}{G_{m3}C_{C1}} - \frac{C_{C2}}{G_{m2}} + \frac{C_{C2}}{G_{m3}} \right)s + \frac{C_{C2}C_L}{G_{m2}G_{m3}}s^2 \right]}$$

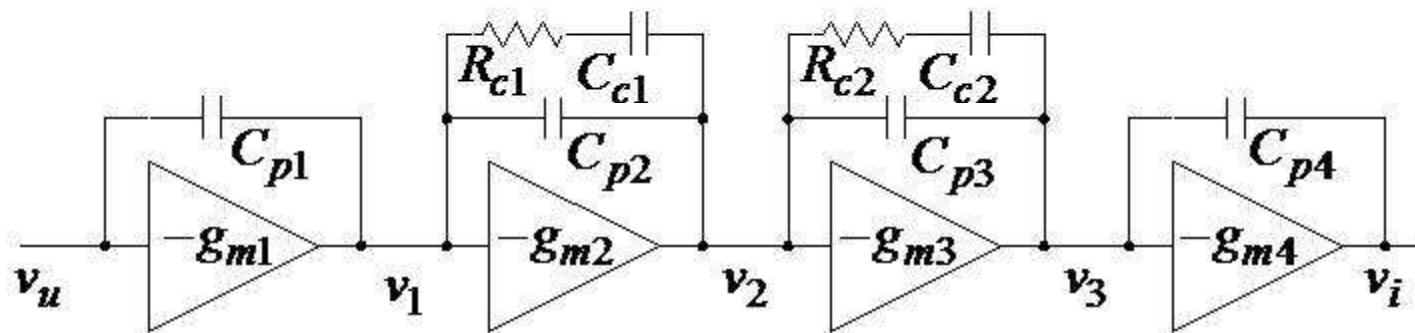
a A_0 i p_1 su kao kod ugnježdene Milerove kompenzacije

Manje je kapacitivno opterećenje izlaza, male kompenzacione kapacitivnosti i velika jedinična učestanost. Velika osetljivost na C_L .

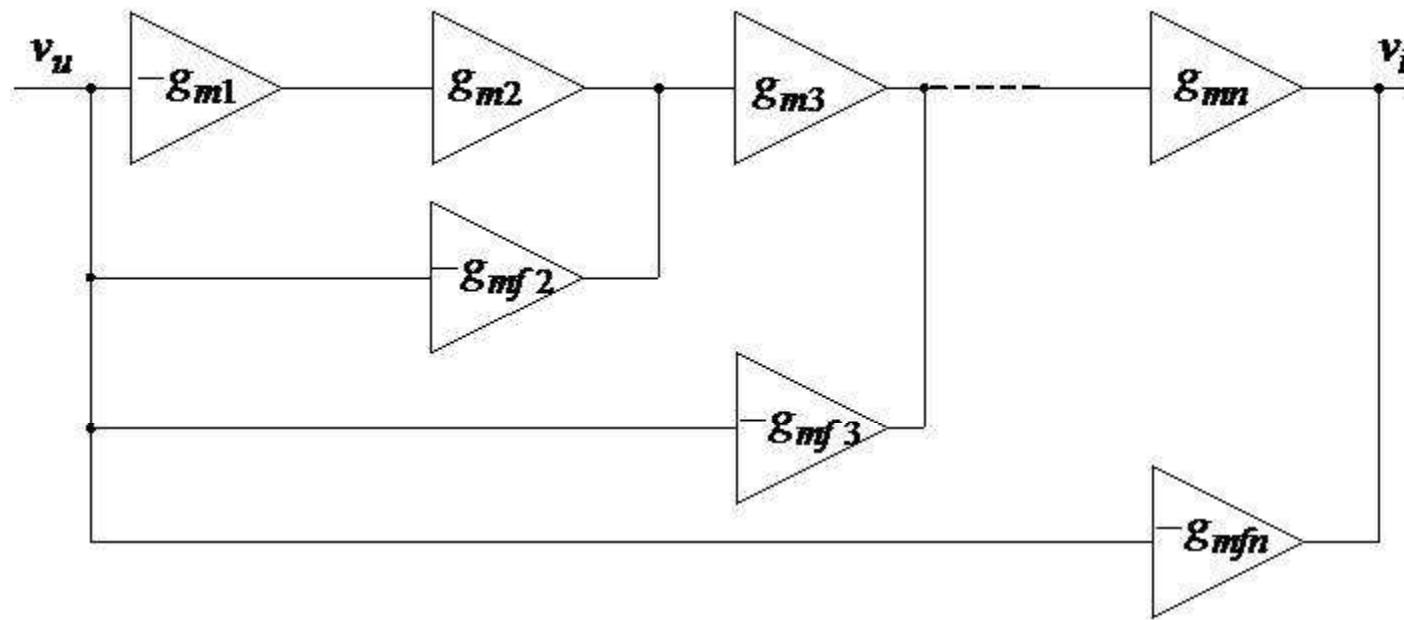
Poništavanje nula u desnoj poluravni: ugnježdena $g_m - C$ kompenzacija (kompenzacija premošćavanjem; uslov za poništavanje nula u desnoj poluravni: $g_{mfi} = g_{mi}$). Naziva se i ugnježdenom Milerovom kompenzacijom sa više putanja.



Kompenzacija višestepenog pojačavača lokalnom primenom razdvajanja polova na $n-2$ stepena; niži nedominantni polovi su poništeni nulama prebačenim u levu poluravan podešavanjem vrednosti otpornika R_{ci} . Stvaraju se dodatni nedominantni polovi.

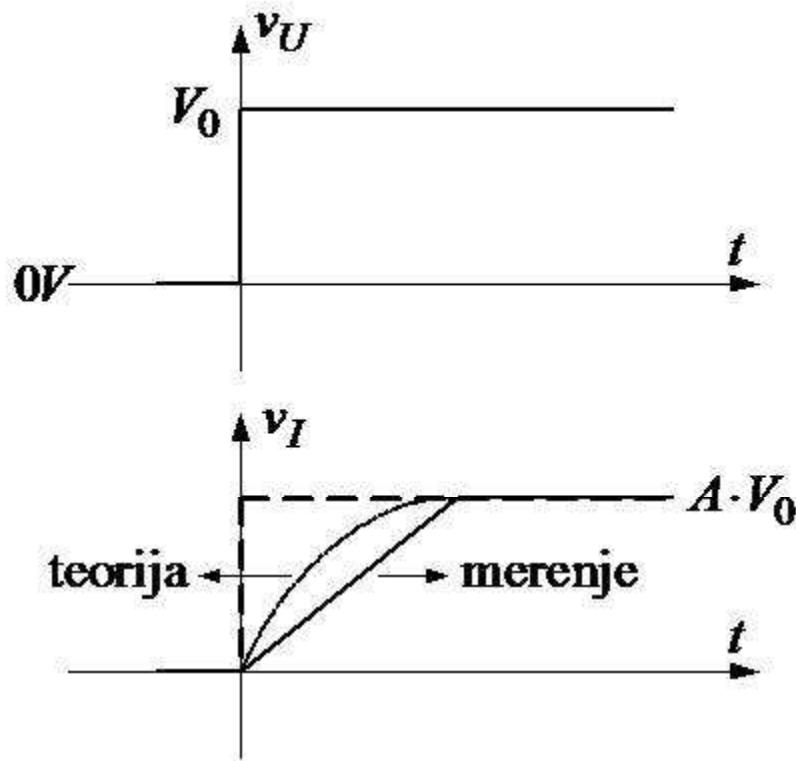


Kompenzacija višestepenog pojačavača bez kompenzacionih kondenzatora: višestruko premoščavanje



Niži nedominantni polovi su poništeni nulama u levoj poluravni koje su nastale primenom stepena za premoščavanje. Ako poništavanje nije potpuno, dublet nula – pol povećava vreme smirivanja u vremenskom odzivu.

Maksimalna brzina promene v_I (Slew Rate)

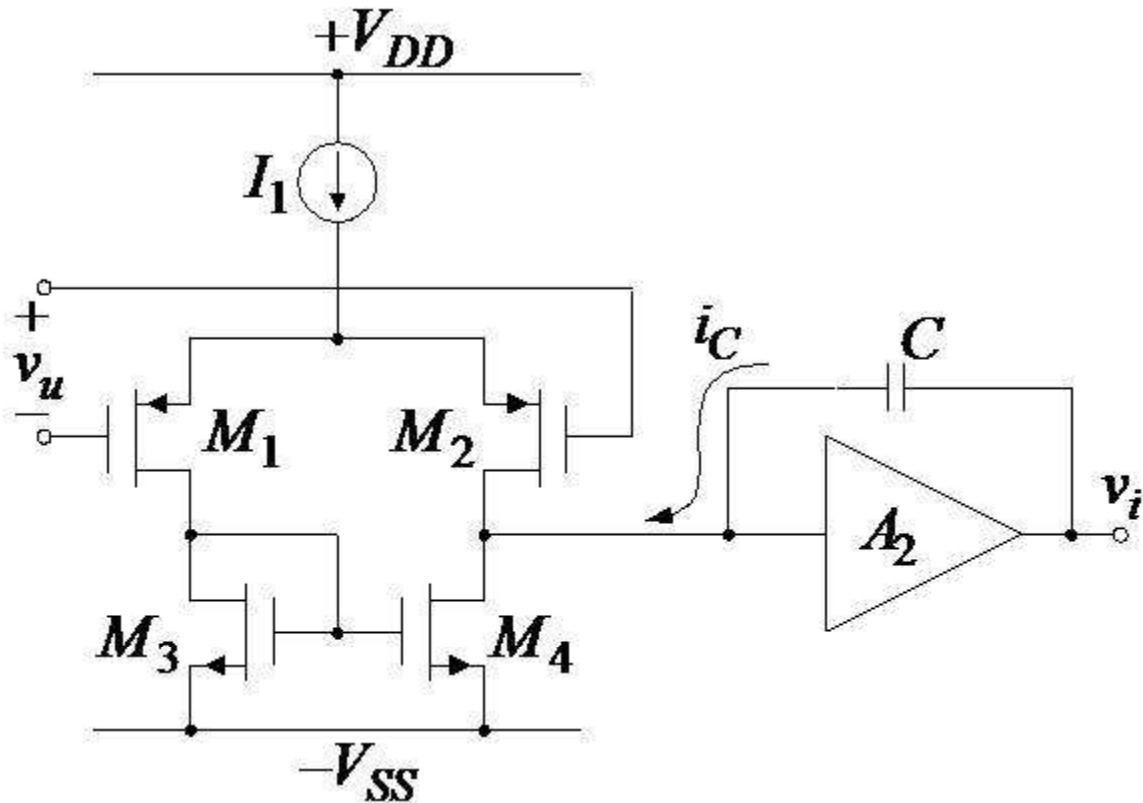


! SR [V/ μ s] se definiše za velike signale

← Signal "velike" amplitude i
veoma strme ivice (trenutna
promena $0V \rightarrow V_0$)

← Ako je $A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_p}}$ očekuje
se eksponencijalno uspostavljanje
 v_I i to utoliko brže ukoliko je ω_p
veće

Međutim, v_I je linearna funkcija vremena dok ne dostigne konačnu vrednost \Rightarrow
analiza za male signale ne važi (tj. $v_I \neq A(s) \cdot v_U$), jer zbog velikih napona OP
izlazi iz linearog režima rada, odnosno tranzistori mogu da pređu u zakočenje
ili omsku oblast.



$$v_U = 0 \Rightarrow i_{D1} = i_{D2} = \frac{I_1}{2}$$

M_1 i M_2 su zasićeni

$v_U \gg 0 \quad M_2$ se zakoči

$$\Rightarrow i_{D1} = I_1 = i_{D3} = i_{D4} = i_C$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_C}{C}$$

$$\Delta v_I \approx \Delta v_C$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\Delta v_I}{\Delta t} \right)_{\max} = \frac{I_1}{C}$$

slično: $v_U \ll 0 \quad M_1$ se zakoči $\Rightarrow i_{D2} = I_1; M_3, M_4$ zakočeni

$$\Rightarrow i_C = -i_{D2} = -I_1 \quad \frac{\Delta v_I}{\Delta t} = -\frac{I_1}{C}$$

$$\text{SR} = \left| \frac{dv_I}{dt} \right|_{\max} \quad \text{SR} = \frac{I_1}{C} \quad \leftarrow \text{Za povećanje treba povećati struju}$$

polarizacije I_1 ili smanjiti kompenzacioni kondenzator C

- ⇒ Ako se C puni / prazni konstantnom strujom, v_I linearno raste u vremenu, sa nagibom koji ne zavisi od ulaznog signala ($\sim SR$)
 - za rastuću i opadajuću ivicu ne mora da bude ista vrednost SR (zavisno od šeme kola)

$$\left| \frac{dv_I}{dt} \right|_{\max} = \frac{\omega_T \cdot I_1}{g_{mu}} \Rightarrow \text{ako je } \omega_T \text{ zadato, SR zavisi samo od } \frac{I_1}{g_{mu}}$$

(zato se npr. ubacuju otpornici u dif. pojačavač i smanjuje se g_{mu})

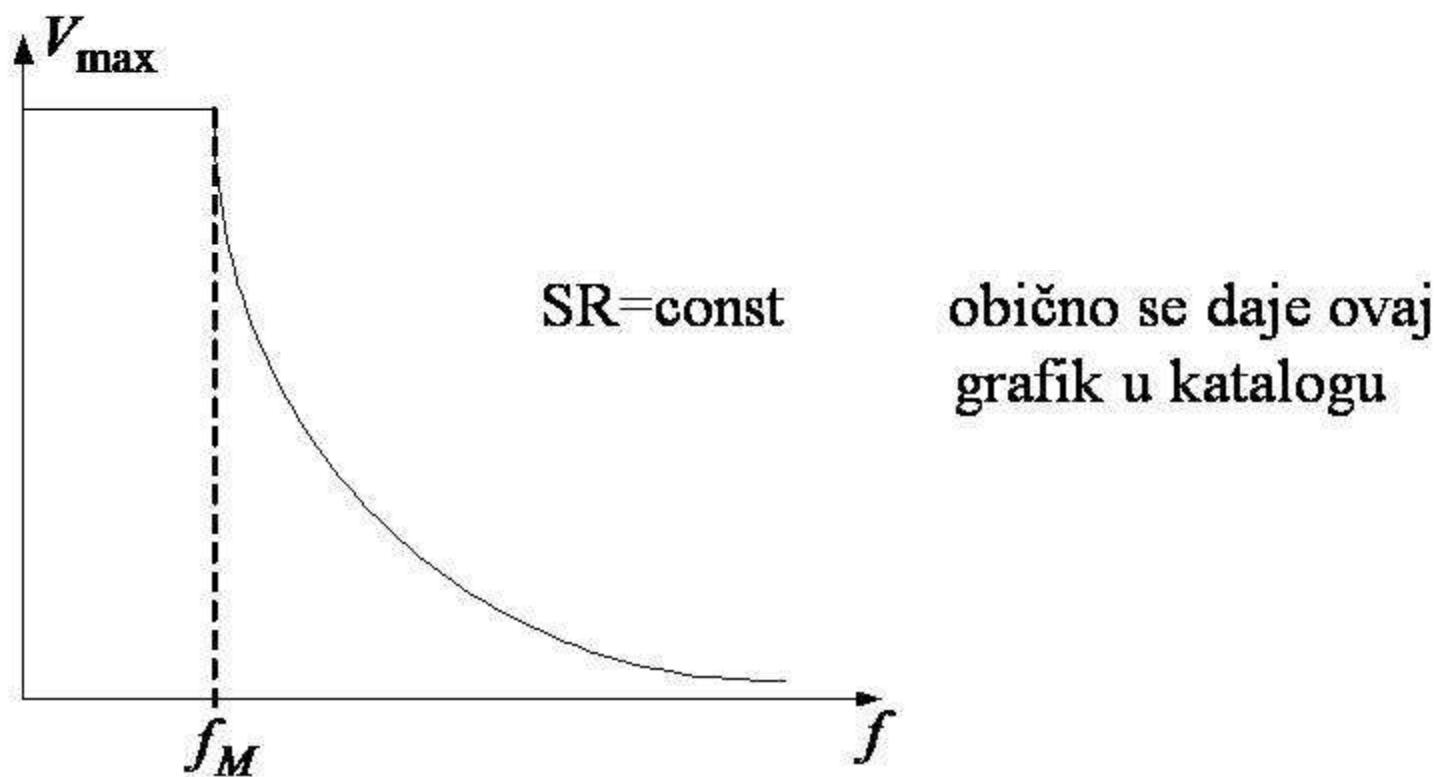
- propusni opseg za velike signale: $v_U = V_0 \sin \omega t \Rightarrow$ izlazni napon može imati maksimalnu amplitudu određenu "output swing" - om

$$v_I = \frac{V_{\max}}{2} \cdot \sin \omega t, \quad \frac{dv_I}{dt} = \frac{\omega V_{\max}}{2} \cdot \cos \omega t \Rightarrow \left| \frac{dv_I}{dt} \right|_{\max} = \frac{\omega V_{\max}}{2}$$

⇒ do izobličenja neće doći sve dok je $SR > \frac{\omega V_{\max}}{2}$, tj. najveća

učestanost na kojoj signal nije izobličen je $f_M = \frac{2 \cdot SR}{2\pi \cdot V_{\max}} = \frac{SR}{\pi \cdot V_{\max}}$
 to je propusni opseg za velike signale

! Ako je amplituda izlaznog signala manja od $V_{\max}/2$, učestanost na kojoj dolazi do izobličenja je $f > f_M$



- povećavanje SR kod MOS OP

$$SR = \frac{\omega_T \cdot I_1}{g_{mu}} \leq \frac{\omega_{p2} \cdot I_1}{g_{mu}} \quad \text{zbog FM}$$

$$SR \leq \frac{I_1}{\sqrt{2k' \frac{W_1}{L_1} \cdot \frac{I_1}{2}}} \cdot \omega_{p2} = \sqrt{\frac{I_1}{k' \frac{W_1}{L_1}}} \cdot \omega_{p2} \propto \sqrt{I_1}$$

ili ako je $I_1 = \text{const}$ treba smanjiti g_{mu} , npr. ubacivanjem R_S u

diferencijalni pojačavač: $g_{mu}^* = \frac{g_{mu}}{1 + g_{mu} R_S} \quad (< g_{mu})$

!!! obično se SR definiše za jedinični pojačavač jer on zahteva najveću vrednost C

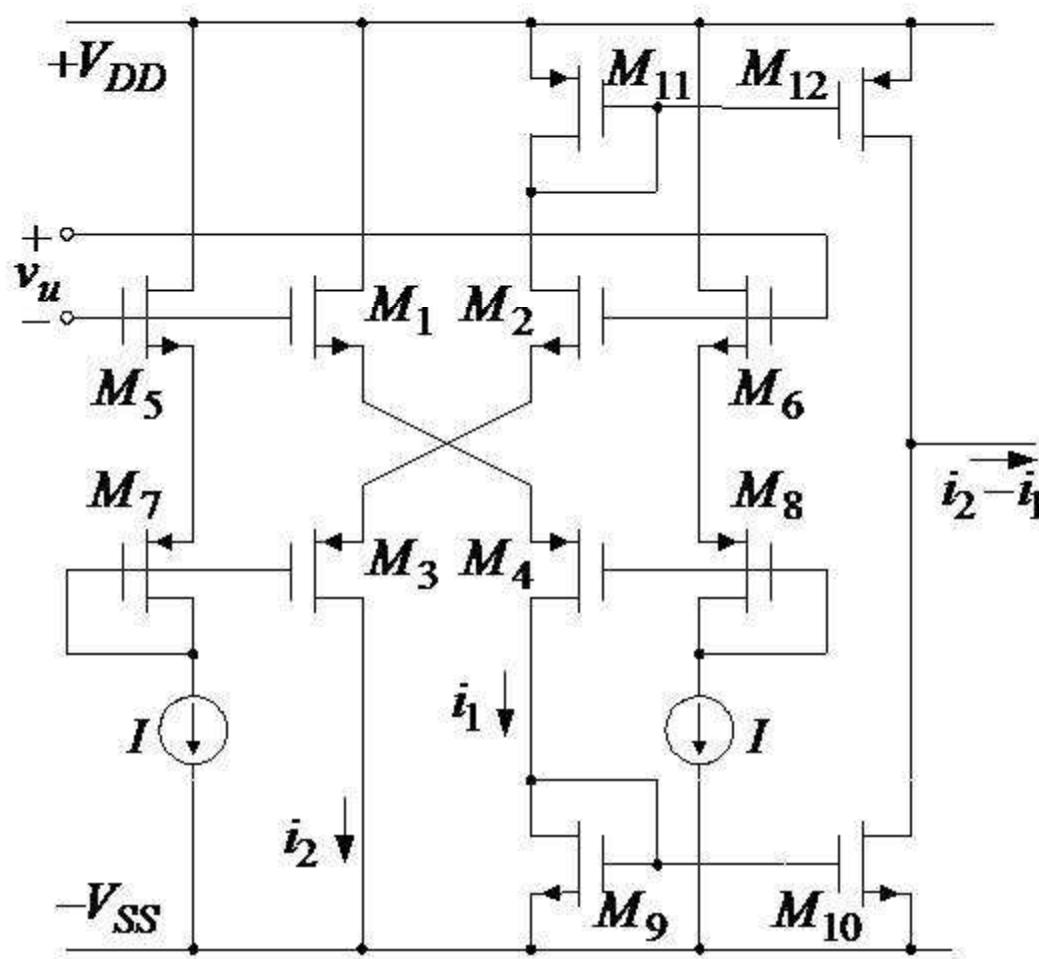
Povećanje maksimalne struje kroz C : diferencijalni pojačavač sa $i_1 + i_2 \neq \text{const}$

$$v_U = -v_{GS1} - v_{SG4} + v_{SG8} + v_{GS6}$$

$$\underline{v_U = +v_{GS2} + v_{SG3} - v_{GS5} - v_{SG7}}$$

$$v_U = (\sqrt{2I} - \sqrt{2i_1}) \left(\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}} \right)$$

$$v_U = (-\sqrt{2I} + \sqrt{2i_2}) \left(\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}} \right)$$



za $|v_U| < \left(\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}} \right) \cdot \sqrt{2I}$:

$$i_2 - i_1 = v_U \cdot 2\sqrt{2I} / \left(\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}} \right)$$

\uparrow
struja je proporcionalna ulaznom
naponu

za $|v_U| > \left(\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}} \right) \cdot \sqrt{2I}$:

$i_1 = 0$ (ili $i_2 = 0$);

$$|i_2 - i_1| = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{|v_U|}{\frac{1}{\sqrt{B_P}} + \frac{1}{\sqrt{B_N}}} + \sqrt{2I} \right)^2 \right]$$

\uparrow
struja je proporcionalna kvadratu
ulaznog napona

