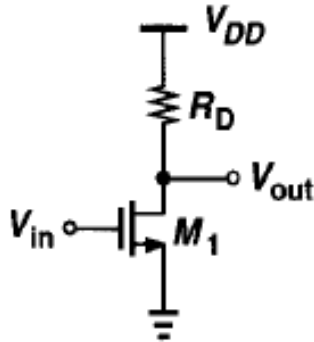


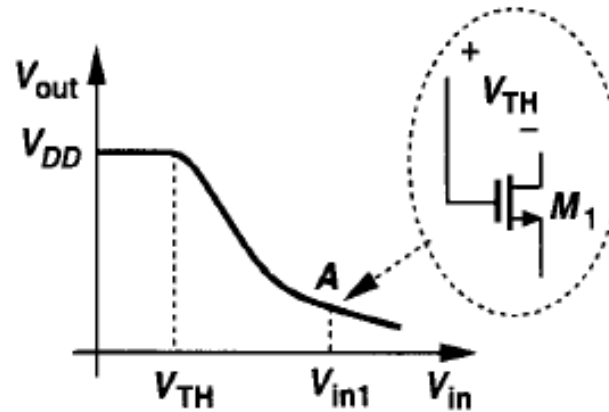
Pojačala

Napredni postupci u projektiranju
analognih integriranih sklopova

Spoj zajedničkog uvoda



Spoj zajedničkog uvoda



Prijenosna karakteristika

Za $U_{ul} < U_{GS0}$ tranzistor ne vodi, $U_{iz} = U_{DD}$

Za $U_{ul} = U_{GS0}$ formira se kanal i tranzistor ulazi u zasićenje

$$U_{DS} = U_{IZ} = U_{DD} - I_D \cdot R_D$$

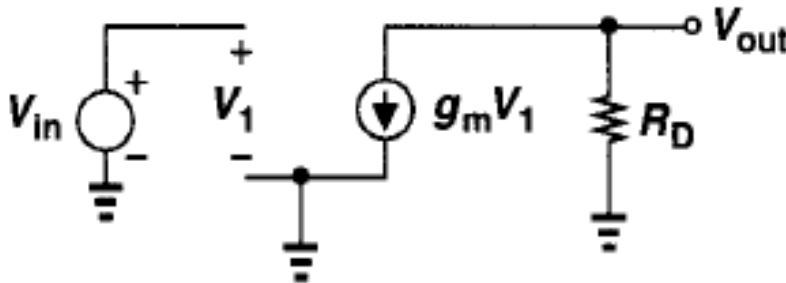
Kako $U_{ul} = U_{GS}$ raste, I_D raste i U_{DS} se smanjuje

Kada U_{DS} postane za U_{GS0} negativniji od U_{GS} tranzistor ulazi u triodno područje (točka A)

Nagib prijenosne karakteristike je naponsko pojačanje koje je veliko dok je tranzistor u području zasićenja

Spoj zajedničkog uvoda

Nadomjesni model za mali signal



Pojačanje:

$$A_v = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{-g_m V_1 R_D}{V_1} = -g_m R_D$$

Pojačanje je negativno, u_{ul} i u_{iz} su u protufazi

$$g_m = \left. \frac{\delta i_D}{\delta u_{GS}} \right|_Q = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{GS0})$$

Strmina se mijenja ovisno o ulaznom naponu U_{GS}

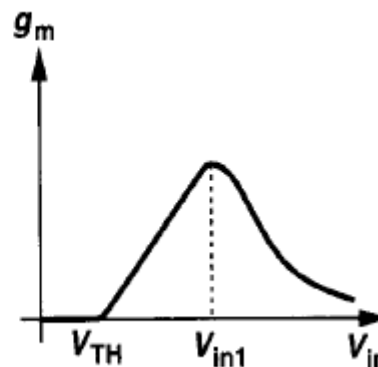
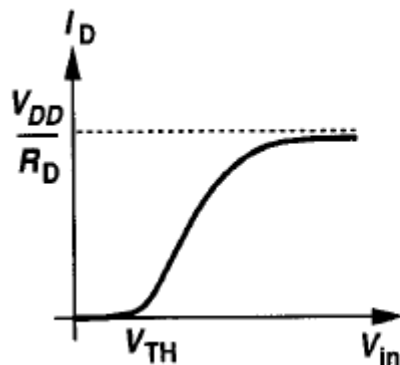
Pojačanje se mijenja ako je ulazni signal velik

Ako se pojačanje znatno mijenja s hodom napona, sklop radi u režimu velikog signala

Ovisnost pojačanja o hodu signala dovodi do nelinearnosti

Spoj zajedničkog uvoda

Ovisnost struje i strmine o ulaznom naponu



Za $U_{ul} > U_{GS0}$ tranzistor ulazi u zasićenje:

- Struja I_D raste, U_{DS} se smanjuje
- Strmina raste linearno s U_{GS}

$$g_m = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{GS0}) = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{ul} - U_{GS0})$$

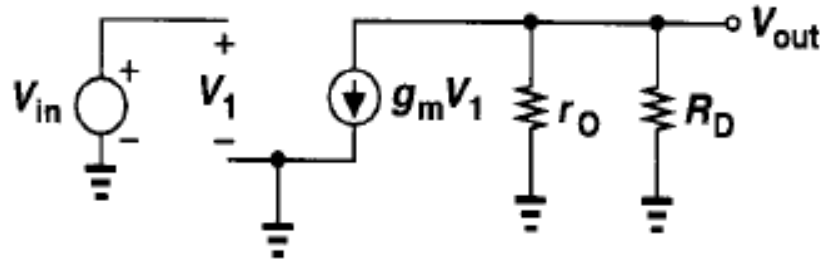
Za $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0} = U_{ul} - U_{GS0}$ tranzistor ulazi u triodno

- Struja I_D teži prema U_{DD}/R_D jer $U_{DS} \rightarrow 0$
- Strmina opada

$$g_m = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} U_{DS}$$

Spoj zajedničkog uvoda – utjecaj izlaznog din. otpora

Nadomjesni model za mali signal



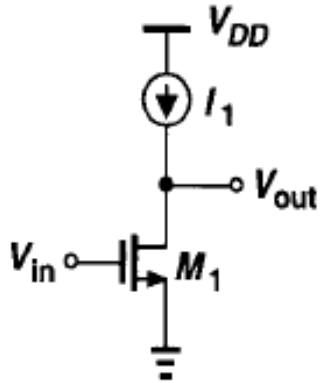
$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{-g_m V_1 (R_D \parallel r_o)}{V_1} = -g_m (R_D \parallel r_o) = -g_m (R_D \parallel r_d)$$

r_d smanjuje pojačanje

Pojačana izlazna struja $g_m V_1$ se dijeli između r_d i R_D

Spoj zajedničkog uvoda – utjecaj izlaznog din. otpora

Za sklop na slici izračunati pojačanje za mali signal. Pretpostaviti da je M1 u zasićenju



I_1 predstavlja beskonačnu impedanciju

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -g_m r_O = -g_m r_d$$

Ovo predstavlja intrinzično pojačanje. Maksimalno naponsko pojačanje koje tranzistor može dati

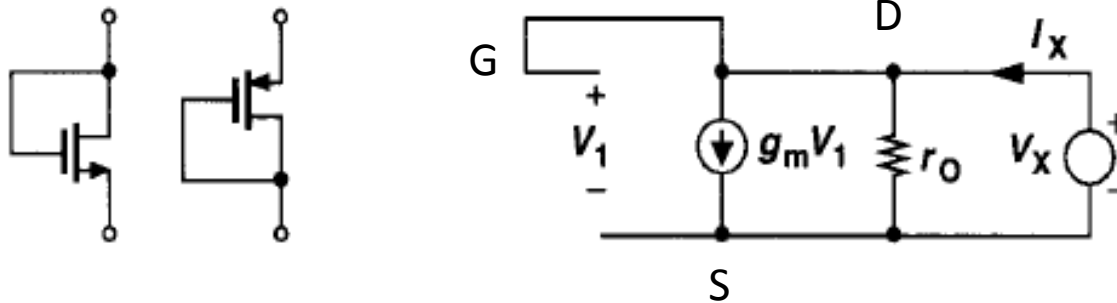
Za moderne CMOS tranzistore s kratkim kanalom $g_m r_O$ je između 10 i 30 pa se može reći da je $\frac{1}{g_m} \ll r_O$

Na slici Kirchhoff-ov zakon za struje zahtijeva $I_{D1} = I_1$. Kako je onda moguće sa U_{ul} promijeniti izlaznu struju ?

$$I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (U_{ul} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{iz}) = I_1$$

Ako se U_{ul} poveća, U_{iz} se mora smanjiti tako da I_{D1} ostane konstantno

Diodno spojeno opterećenje



Diodno spojen tranzistor je u zasićenju jer $U_{DS} = U_{GS} > U_{GS} - U_{GS0}$
Otpor koji se vidi sa odvoda je V_X/I_X :

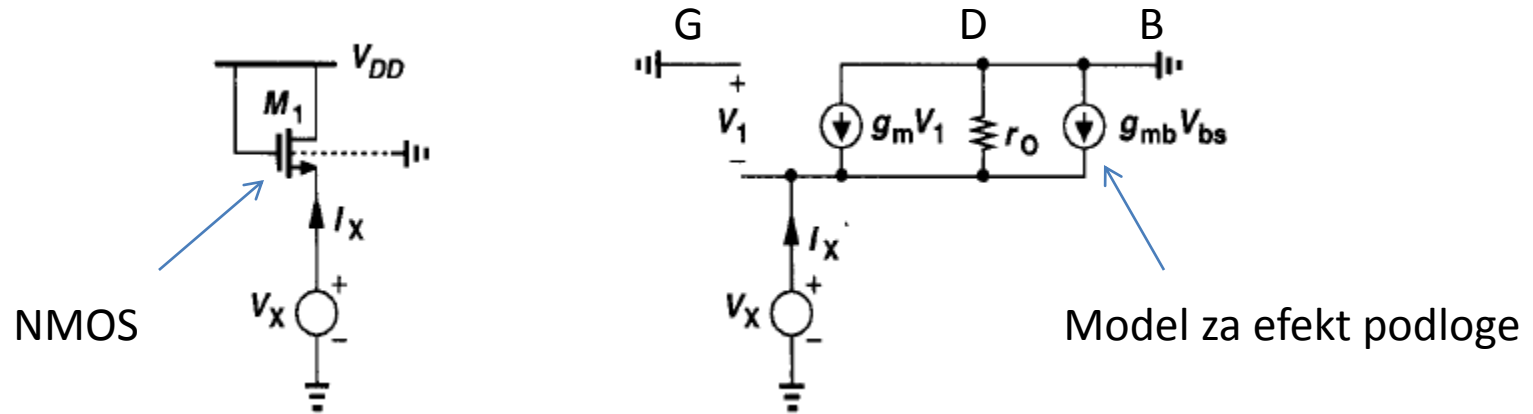
$$I_X = \frac{V_X}{r_o} + g_m V_1 = \frac{V_X}{r_o} + g_m V_X$$

$$\frac{I_X}{V_X} = \frac{1}{r_o} + g_m \Rightarrow \frac{V_X}{I_X} = r_o \parallel \frac{1}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

Otpor koji se vidi sa odvoda je mali, puno manji od r_o

Spoj zajedničkog uvoda s diodno spojenim opterećenjem

Ako je prisutan efekt podloge (body effect) otpor u odvodu:



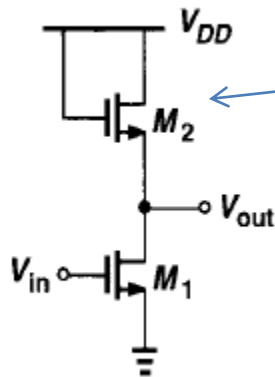
Podloga djeluje kao donja upravljačka elektroda. S dvije upravljačke elektrode boja je kontrola naboja u kanalu pa je strmina veća.

$$V_{bs} = -V_X, V_1 = -V_X$$

$$-I_X = g_m V_1 + g_{mb} V_{bs} - \frac{V_X}{r_O} \Rightarrow -I_X = -g_m V_X - g_{mb} V_X - \frac{V_X}{r_O}$$

$$\frac{I_X}{V_X} = \frac{1}{r_O} + g_m + g_{mb} \Rightarrow \frac{V_X}{I_X} = r_O \left\| \frac{1}{g_m + g_{mb}} \right\| \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

Spoj zajedničkog uvoda s diodno spojenim opterećenjem



NMOS, uvod nije na masi - efekt podloge

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -g_{m1} \cdot \text{otpor u krugu odvoda} =$$

$$= -g_{m1} \left(r_{d1} \parallel r_{d2} \parallel \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} \right) \approx -g_{m1} \cdot \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \cdot \frac{1}{1 + \eta}, \quad \eta = \frac{g_{mb}}{g_{m2}}$$

Ako raspišemo strmine:

$$A_V = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \cdot \frac{1}{1 + \eta} = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_1 I_{D1}}}{\sqrt{2\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_2 I_{D2}}} \cdot \frac{1}{1 + \eta} \Rightarrow (I_{D1} = I_{D2}) \Rightarrow A_V = -\frac{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2}} \cdot \frac{1}{1 + \eta}$$

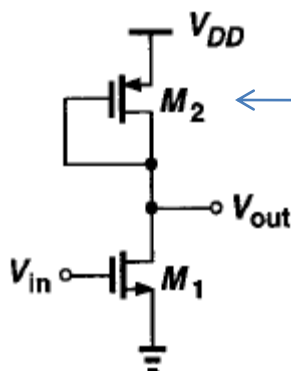
Spoj zajedničkog uvoda s diodno spojenim opterećenjem

$$A_v = - \frac{\sqrt{(W/L)_1}}{\sqrt{(W/L)_2}} \cdot \frac{1}{1 + \eta}$$

Ako zanemarimo ovisnost η o U_{iz} , pojačanje je konstantno i ne ovisi o struji i naponu napajanja.

Prijenosna karakteristika je relativno linearna.

Spoj zajedničkog uvoda s diodno spojenim PMOS teretom



PMOS, uvod je na V_{DD} - nema efekta podloge

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = -g_{m1} \cdot \text{otpor u krugu odvoda} = -g_{m1} \left(r_{d1} \parallel r_{d2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right) \approx -\frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

Ako raspišemo strmine:

$$A_V = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_1 I_{D1}}}{\sqrt{2\mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_2 I_{D2}}} \Rightarrow (I_{D1} = I_{D2}) \Rightarrow A_V = -\frac{\sqrt{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2}}$$

Pojačanje relativno slabo ovisi o dimenzijama tranzistora (nalaze se ispod korijena)
Ako gledamo strmine – za pojačanje trebamo “jaki” ulazni tranzistor i “slabi” tranzistor za trošilo

Spoj zajedničkog uvida s diodno spojenim PMOS teretom

Primjer: Koliki mora biti omjer dimenzija PMOS i NMOS tranzistora ako želimo dobiti pojačanje $A_V = -10$. Pretpostaviti $\mu_n = 2 \cdot \mu_p$

$$A_V = -\frac{\sqrt{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2}} = -10 \Rightarrow \frac{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1}{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2} = 100 \Rightarrow \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_2} = 100 \frac{\mu_p}{\mu_n} = 50$$

Zbog velikih razlika u dimenzijama dobivamo veliki ulazni kapacitet koji predstavlja opterećenje za prethodni stupanj.

Za veliko pojačanje postoji problem hoda napona:

$$A_V = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -\frac{\frac{I_{D1}}{2(U_{GS1} - U_{GS0})}}{\frac{I_{D2}}{2(U_{GS2} - U_{GS0})}} \Rightarrow (I_{D1} = I_{D2}) \Rightarrow A_V = -\frac{(U_{GS2} - U_{GS0})}{(U_{GS1} - U_{GS0})}$$

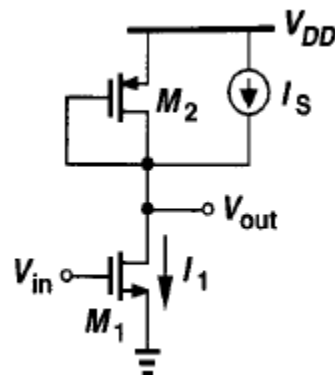
Npr. Za pojačanje 10, prenapon upravljačke elektrode M2 mora biti 10x veći nego za M1

$$U_{GS1} - U_{GS0} = 200 \text{ mV} \Rightarrow U_{GS2} - U_{GS0} = 2 \text{ V}$$

$$\text{už } U_{GS0} = 0.7 \text{ V} \Rightarrow U_{GS2} - U_{GS0} = 2.7 \text{ V}$$

Spoj zajedničkog uvoda s diodno spojenim PMOS teretom

Primjer: U sklopu na slici tranzistor M1 je postavljen u područje zasićenja sa radnom strujom I_1 . Strujni izvor daje struju $I_S = 0.75I_1$. Izvesti izraz za pojačanje.



$$A_V = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -\frac{\sqrt{2\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_1 I_{D1}}}{\sqrt{2\mu_p C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_2 I_{D2}}} \Rightarrow (I_{D1} = 4I_{D2}) \Rightarrow A_V = -\frac{\sqrt{4\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_1}}{\sqrt{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_2}}$$

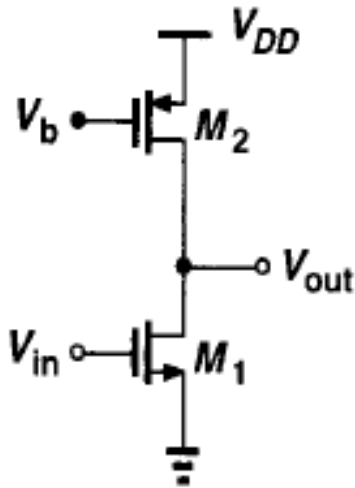
Pojačanje je dvostruko veće

$$A_V = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -\frac{\frac{I_{D1}}{2(U_{GS1} - U_{GS0})}}{\frac{I_{D2}}{2(U_{GS2} - U_{GS0})}} \Rightarrow (I_{D1} = 4I_{D2}) \Rightarrow \frac{A_V}{4} = -\frac{(U_{GS2} - U_{GS0})}{(U_{GS1} - U_{GS0})}$$

Npr. Za pojačanje 10, prenapon upravljačke elektrode M2 mora biti 2.5x veći nego za M1

Ili ako zadržimo jednake prenapone upravljačke elektrode pojačanje je 4x veće

Spoj zajedničkog uvoda sa strujnim izvorom kao teretom



M1 i M2 moraju biti u zasićenju

$$|U_{DS2}| > |U_{GS2} - U_{GS0}|$$

Postižu se visoki iznosi dinamičkog otpora uz relativno mali napon U_{DS} – puno povoljnije nego da imamo otpornik

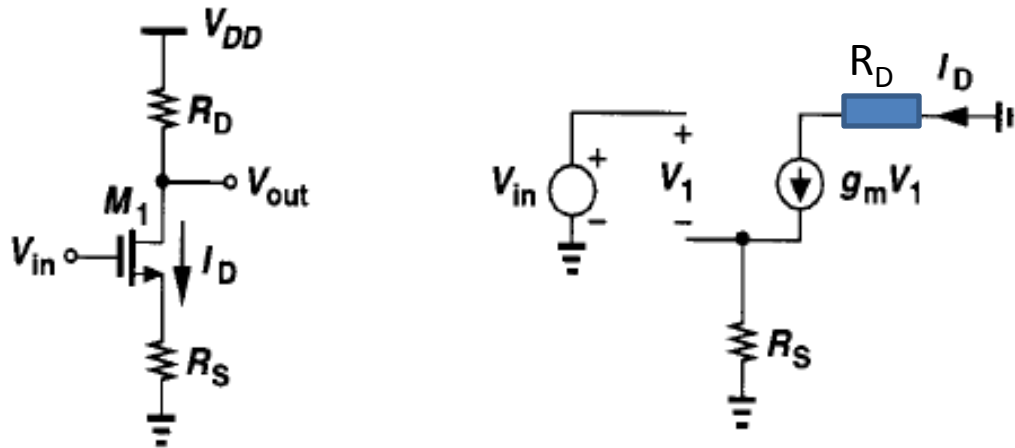
$$A_V = -g_{m1}(r_{O1} \parallel r_{O2})$$

Za veći r_{O2} može se povećati duljina i širina kanala uz isti prenapon upravljačke elektrode
Pri tome raste kapacitet u izlaznom čvoru

DC napon izlaznog čvora nije dobro definiran jer je osjetljiv na parametre tranzistora M1 i M2 te jako ovisi o procesu

Obično se koristi povratna veza za stabilizaciju tog napona

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom



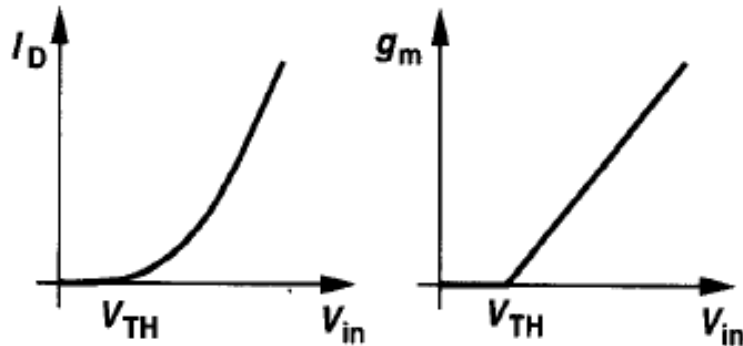
$$A_V = -\frac{g_{m1}}{1 + g_{m1}R_S} R_D = -G_m R_D$$

Za veći R_S strmina G_m postaje manje ovisna o g_m

$$G_m = \frac{g_{m1}}{1 + g_{m1}R_S} = \frac{1}{\frac{1}{g_{m1}} + R_S} \Rightarrow \frac{1}{g_{m1}} \ll R_S \Rightarrow G_m = \frac{1}{R_S} \Rightarrow \Delta I_D = \frac{\Delta U_{ul}}{R_S}$$

Struja postaje linearno ovisna o ulaznom naponu

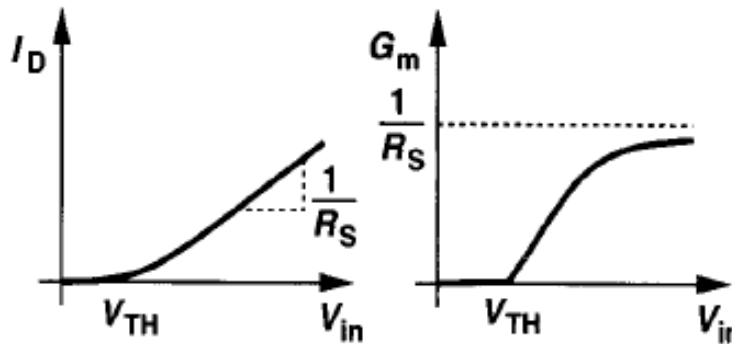
Spoj zajedničkog uvida s uvodskom degeneracijom



Zajednički uvid bez degeneracije

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

$$g_m = K(U_{GS} - U_{GS0})$$



Zajednički uvid s degeneracijom:

Za male I_D $1/g_m \gg R_S$:

$$G_m = g_m$$

Za velike I_D $1/g_m \ll R_S$:

$$G_m = 1/R_S$$

$$G_m = \frac{g_{m1}}{1 + g_{m1}R_S} = \frac{1}{\frac{1}{g_{m1}} + R_S} \Rightarrow \frac{1}{g_{m1}} \ll R_S \Rightarrow G_m = \frac{1}{R_S} \Rightarrow \Delta I_D = \frac{\Delta U_{ul}}{R_S}$$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Ako napišemo pojačanje na sljedeći način

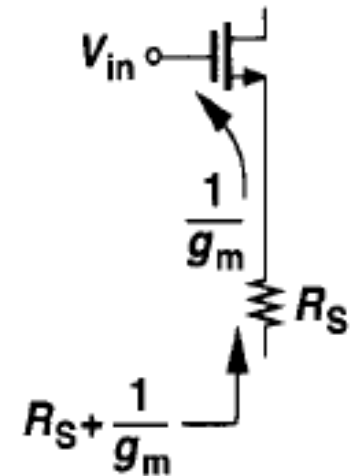
$$A_v = -\frac{g_{m1}}{1 + g_{m1}R_S} R_D = -\frac{R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + R_S}$$

Nazivnik predstavlja serijsku kombinaciju R_S i otpora koji se vidi kada gledamo u uvod. To predstavlja otpor u krugu uvoda.

Možemo ga računati tako da odspojimo donji izvod R_S sa mase, kratko spojimo ulaz i gledamo otpor “prema gore”

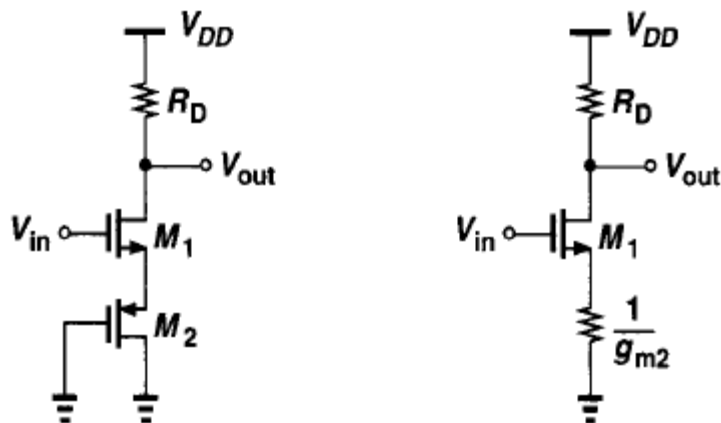
Brojnik izraza za pojačanje predstavlja otpor koji je spojen u odvod.

Pojačanje je otpor spojen u odvodu podijeljen otporom u krugu uvoda



Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

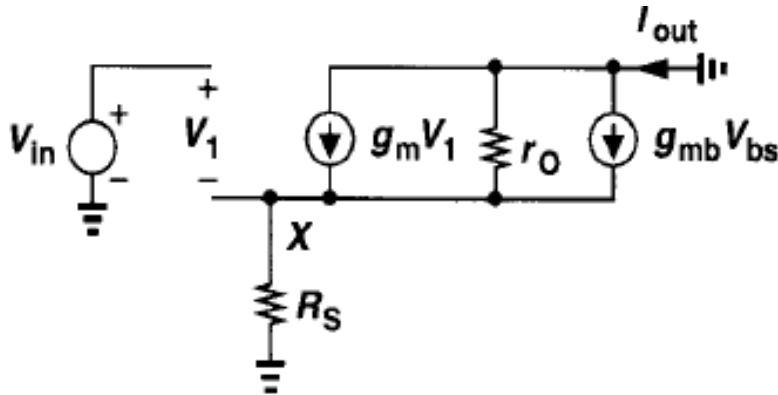
Primjer: Izračunati pojačanje za sklop na slici



$$A_v = - \frac{\text{otpor u odvodu}}{\text{otpor u krugu uvoda}} = - \frac{R_D}{\frac{1}{g_{m2}} + \frac{1}{g_{m1}}}$$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Strmina uz modulaciju duljine kanala i efekt podloge



$$I_{out} = g_m V_1 + g_{mb} V_{bs} - \frac{I_{out} R_S}{r_O}$$

$$V_1 = V_{in} - I_{out} R_S, \quad V_{bs} = -I_{out} R_S$$

$$I_{out} = g_m (V_{in} - I_{out} R_S) + g_{mb} (-I_{out} R_S) - \frac{I_{out} R_S}{r_O}$$

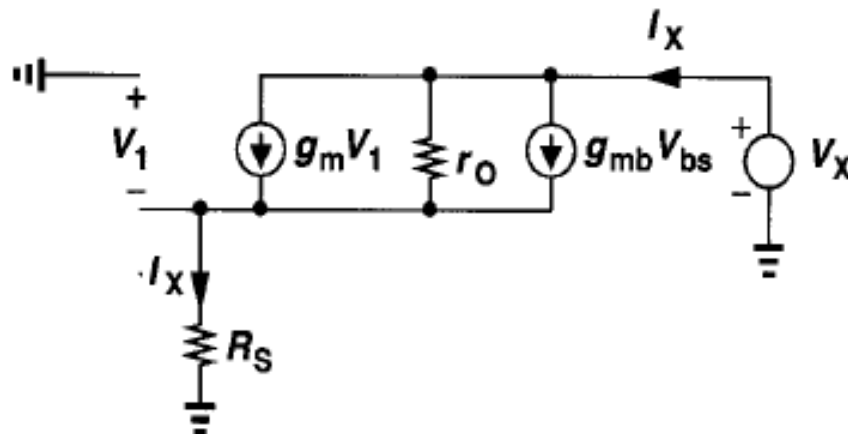
$$I_{out} + (g_m + g_{mb}) I_{out} R_S + \frac{I_{out} R_S}{r_O} = g_m V_{in}$$

$$G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} = (g_m + g_{mb}) I_{out} R_S + \frac{I_{out} R_S}{r_O} = \frac{g_m}{1 + (g_m + g_{mb}) R_S + \frac{R_S}{r_O}} = \frac{g_m r_O}{r_O + (g_m + g_{mb}) R_S r_O + R_S}$$

$$G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{g_m r_O}{R_S + [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] r_O}$$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Izlazni otpor



$$(I_X - g_m V_1 - g_{mb} V_{bs}) \cdot r_O + I_X R_S = V_X$$

$$V_1 = V_{bs} = -I_X R_S$$

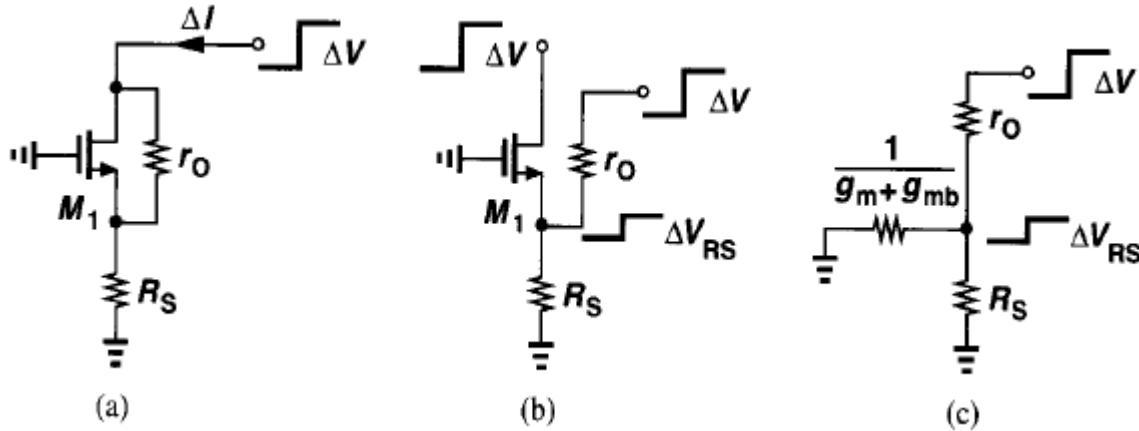
$$[I_X + (g_m + g_{mb}) I_X R_S] \cdot r_O + I_X R_S = V_X$$

$$\frac{V_X}{I_X} = [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] \cdot r_O + R_S = [1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot R_S + r_O$$

Otpor iz uvoda se u odvod preslika pomnožen s pojačanjem tranzistora

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Izlazni otpor – 2.način:



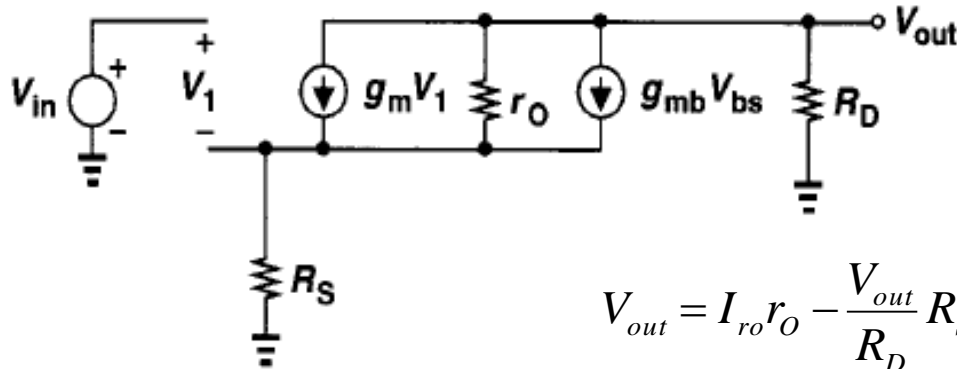
ΔV izaziva promjenu ΔI . Ta struja se zatvara i preko otpornika R_S .
Gledano u uvod tranzistora vidi se otpor $1/(g_m + g_{mb})$

$$\Delta V_{RS} = \Delta V \frac{\frac{1}{g_m + g_{mb}} \parallel R_S}{\frac{1}{g_m + g_{mb}} \parallel R_S + r_O}$$

$$\Delta I = \frac{\Delta V_{RS}}{R_S} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta I} = \left[1 + (g_m + g_{mb}) R_S \right] \cdot r_O + R_S = \left[1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O \right] \cdot R_S + r_O$$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Pojačanje:



$$V_{out} = I_{ro} r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S = \left(-\frac{V_{out}}{R_D} - g_{mb} V_{bs} - g_m V_1 \right) \cdot r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S$$

$$V_{bs} = \frac{V_{out}}{R_D} R_S, \quad V_1 = V_{in} + \frac{V_{out}}{R_D} R_S$$

$$V_{out} = \left(-\frac{V_{out}}{R_D} - g_{mb} \frac{V_{out}}{R_D} R_S - g_m \left(V_{in} + \frac{V_{out}}{R_D} R_S \right) \right) \cdot r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S$$

$$V_{out} + \left(\frac{V_{out}}{R_D} + g_{mb} \frac{V_{out}}{R_D} R_S + g_m \frac{V_{out}}{R_D} R_S \right) \cdot r_O + \frac{V_{out}}{R_D} R_S = -g_m V_{in} r_O$$

$$\boxed{\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-g_m r_O R_D}{R_D + R_S + r_O + (g_m + g_{mb}) R_S r_O}}$$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Pojačanje:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-g_m r_O R_D}{R_D + \boxed{R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O}}$$



Izlazni otpor: $R_{out} = [1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot R_S + r_O$

$$A_v = \frac{-g_m r_O R_D}{R_D + R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O} \cdot \frac{R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O}{R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O}$$

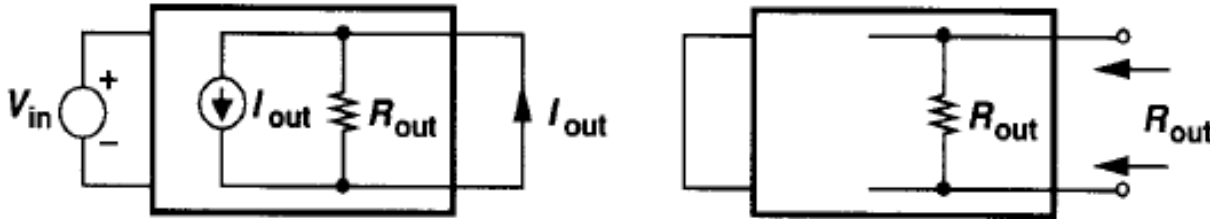
$$A_v = \boxed{\frac{-g_m r_O}{R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O}} \cdot \boxed{\frac{R_D [R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O]}{R_D + R_S + r_O + (g_m + g_{mb})R_S r_O}}$$

$-G_m$

$R_D \parallel R_{out}$

Spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

Lemma: Linearni sklop ima naponsko pojačanje ($-G_m R_{out}$), gdje je G_m strmina sklopa uz kratko spojen izlaz, a R_{out} je izlazni otpor uz kratko spojen ulazni napon .



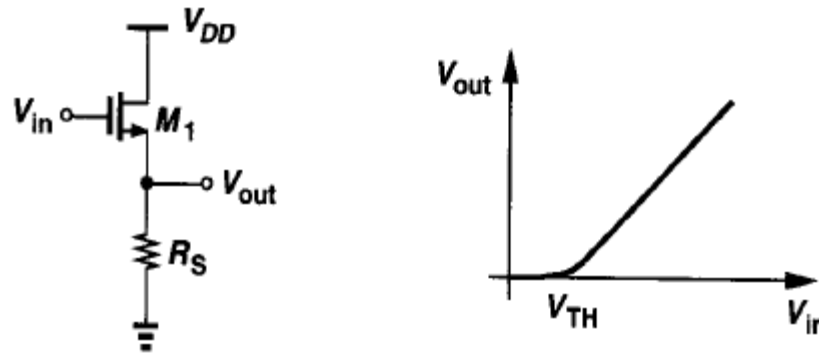
Izlazni napon je:
$$V_{out} = -I_{out} R_{out}$$

Gdje izlaznu struju I_{out} mjerimo uz kratki spoj na izlazu

Uz definiciju:
$$G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}}$$

Dobivamo:
$$V_{out} = -I_{out} R_{out} = -G_m V_{in} R_{out}$$

Uvodsko sljedilo

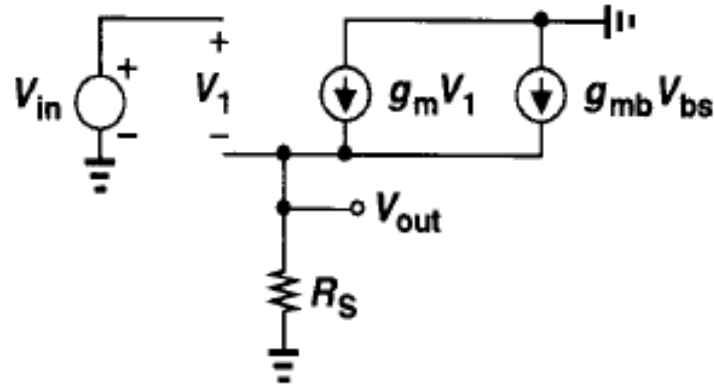


Za $U_{ul} < U_{GS0}$ tranzistor ne vodi

Za $U_{ul} = U_{GS0}$ tranzistor ulazi u zasićenje, struja I_D stvara pad napona na R_S i U_{iz} raste

Kako U_{ul} dalje raste U_{iz} slijedi U_{ul} umanjen za U_{GS}

Uvodsko sljedilo - pojačanje



$$V_{out} = (g_m V_1 + g_{mb} V_{bs}) R_S$$

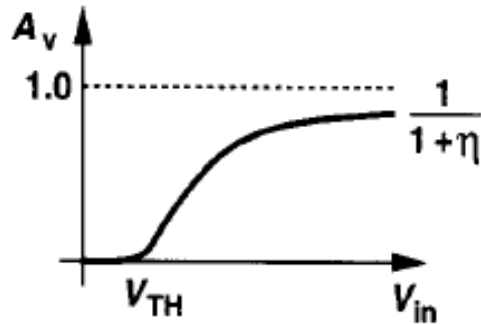
$$V_{bs} = -V_{out}, \quad V_1 = V_{in} - V_{out}$$

$$V_{out} = [g_m (V_{in} - V_{out}) + g_{mb} (-V_{out})] R_S$$

$$V_{out} [1 + (g_m + g_{mb}) R_S] = g_m R_S V_{in}$$

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g_m R_S}{1 + (g_m + g_{mb}) R_S}$$

Uvodsko sljedilo - pojačanje



$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g_m R_S}{1 + (g_m + g_{mb}) R_S}$$

Za $U_{ul} < U_{GS0}$ tranzistor ne vodi

Za $U_{ul} = U_{GS0}$ tranzistor ulazi u zasićenje,

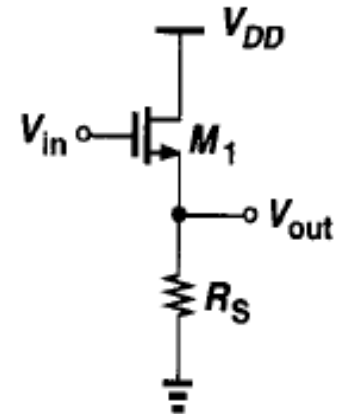
Kako U_{ul} dalje raste struja I_D raste pa g_m raste

$$A_v \approx \frac{g_m}{g_m + g_{mb}} = \frac{1}{1 + \frac{g_{mb}}{g_m}} = \frac{1}{1 + \eta}$$

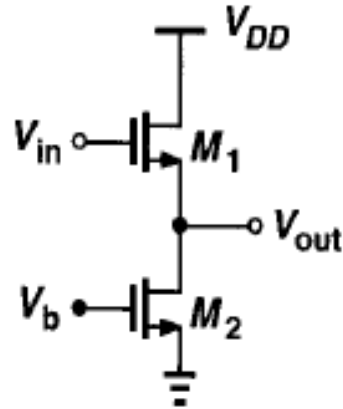
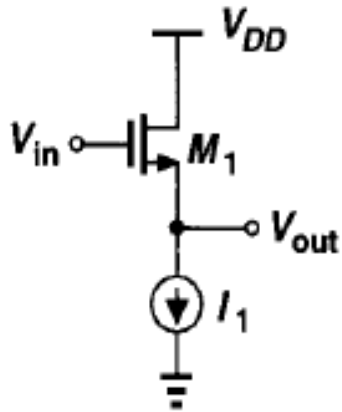
Za tipične napone UBS η ne pada ispod 0.2

Pojačanje je manje od 1

Pojačanje ovisi o amplitudi $U_{ul} \rightarrow$ nelinearnost



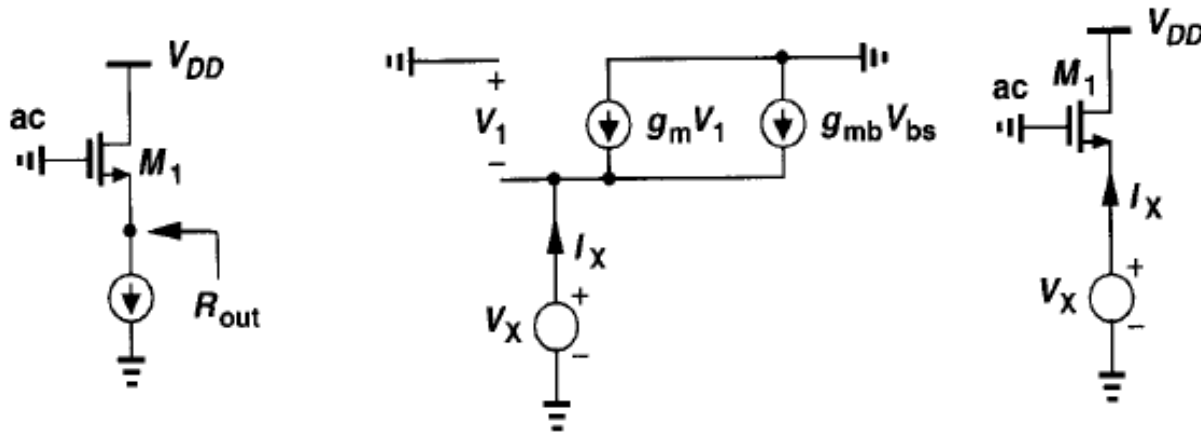
Uvodsko sljedilo - pojačanje



Izvedba sa strujnim izvorom izvedenim s M2

Manja nelinearnost, ostaje nelinearnost zbog utjecaja podloge

Uvodsko sljedilo – izlazni otpor



$$R_{iz} = \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

Općenito karakteristike uvodskog sljedila:

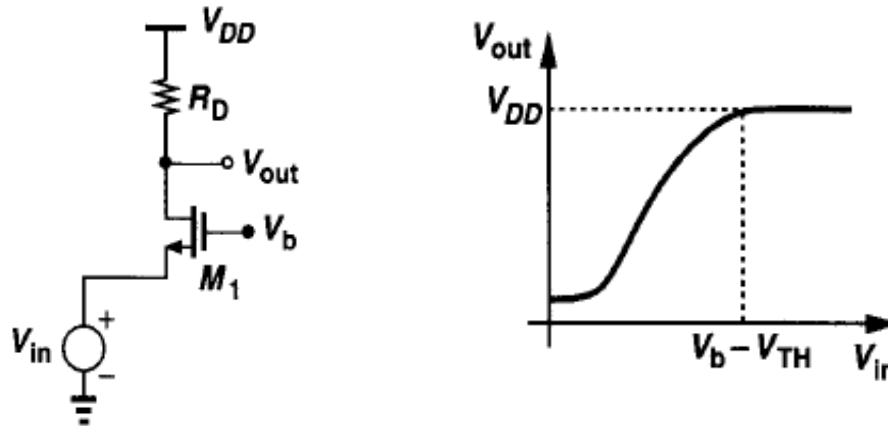
Nelinearnost zbog efekta podloge

Pojačanje je manje od 1, nije najbolji izlazni stupanj

Hod napona je smanjen jer postoji pomak izlaznog napona za U_{GS}

Možda je najuobičajenije da se koristi za pomak naponske razine

Spoj zajedničke upravljačke elektrode



Ako smanjujemo U_{ul} od V_{DD}

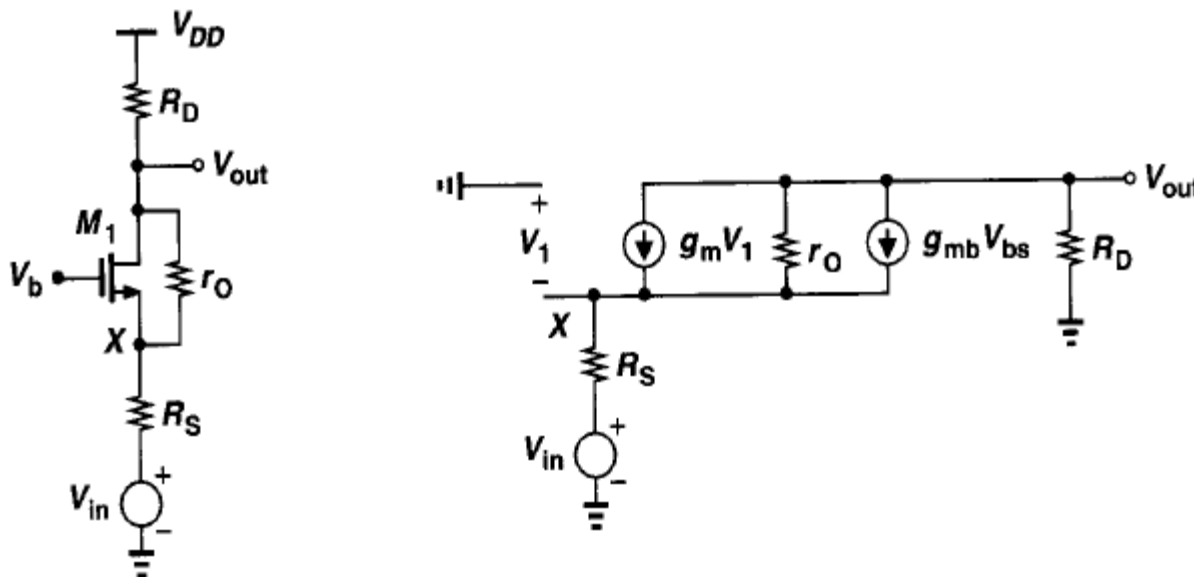
Za napone $U_{ul} > U_b - U_{GS0}$ tranzistor u zapiranjju, $U_{iz} = U_{DD}$

Pri naponu $U_{ul} = U_b - U_{GS0}$ tranzistor provede

Za $U_{ul} < U_b - U_{GS0}$ struja I_D raste i U_{iz} opada

Pojaćanje je pozitivno kao što se vidi iz nagiba prijenosne karakteristike

Spoj zajedničke upravljačke elektrode - pojačanje



$$I_{RS} = \frac{-V_{out}}{R_D}$$

$$V_1 - \frac{V_{out}}{R_D} R_S + V_{in} = 0 \Rightarrow V_1 = \frac{V_{out}}{R_D} R_S - V_{in} = V_{bs}$$

$$V_{out} = \left(-\frac{V_{out}}{R_D} - g_m V_1 - g_{mb} V_{bs} \right) \cdot r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S + V_{in}$$

Spoj zajedničke upravljačke elektrode - pojačanje

$$V_{out} = \left(-\frac{V_{out}}{R_D} - (g_m + g_{mb}) \left(\frac{V_{out}}{R_D} R_S - V_{in} \right) \right) \cdot r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S + V_{in}$$

$$V_{out} + \left(\frac{V_{out}}{R_D} + (g_m + g_{mb}) \frac{V_{out}}{R_D} R_S \right) \cdot r_O + \frac{V_{out}}{R_D} R_S = (g_m + g_{mb}) \cdot r_O V_{in} + V_{in}$$

$$V_{out} \left[1 + \left(\frac{1}{R_D} + (g_m + g_{mb}) \frac{R_S}{R_D} \right) \cdot r_O + \frac{R_S}{R_D} \right] = [1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot V_{in}$$

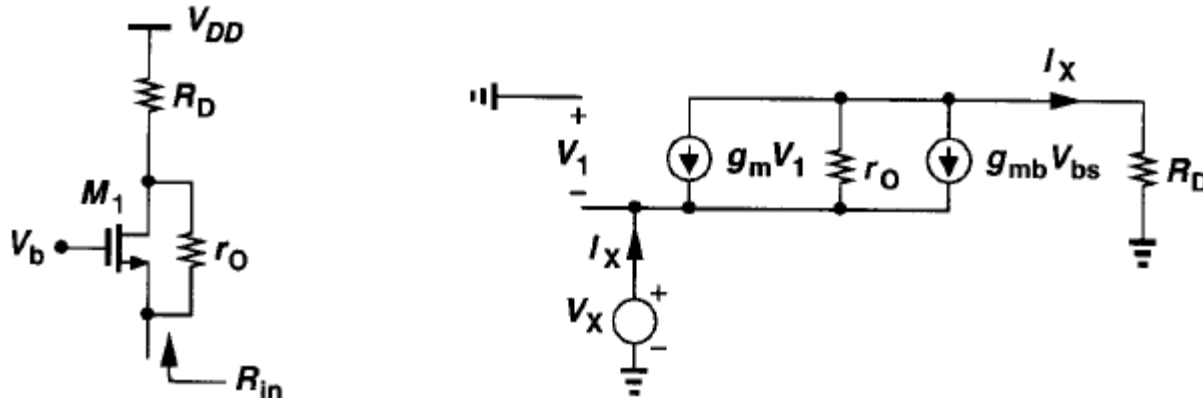
$$V_{out} [R_D + (1 + (g_m + g_{mb}) R_S) \cdot r_O + R_S] = [1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot R_D \cdot V_{in}$$

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{[1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot R_D}{R_D + R_S + (1 + (g_m + g_{mb}) R_S) \cdot r_O}$$

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O}{r_O + (g_m + g_{mb}) R_S \cdot r_O + R_D + R_S} R_D$$

Slično kao za zajednički uvod.
Pojačanje nešto veće zbog
efekta podloge

Spoj zajedničke upravljačke elektrode – ulazni otpor



$$V_X = I_X R_D + (I_X + g_m V_1 + g_{mb} V_{bs}) \cdot r_O$$

$$V_1 = V_{bs} = -V_X$$

$$V_X = I_X R_D + (I_X - (g_m + g_{mb}) V_X) \cdot r_O$$

$$V_X + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O V_X = I_X R_D + I_X r_O$$

$$R_{ul} = \frac{V_X}{I_X} = \frac{R_D + r_O}{1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O} \approx \frac{R_D}{(g_m + g_{mb}) \cdot r_O} + \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

Spoj zajedničke upravljačke elektrode – ulazni otpor

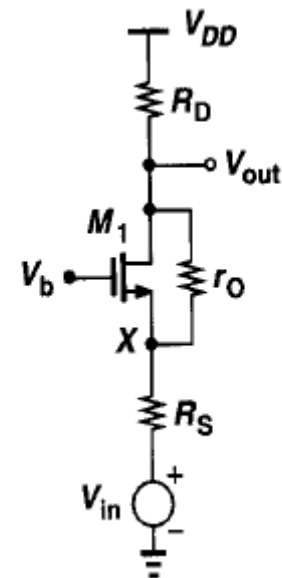
$$R_{ul} = \frac{V_X}{I_X} = \frac{R_D + r_O}{1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O} \approx \frac{R_D}{(g_m + g_{mb}) \cdot r_O} + \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

Otpor iz odvoda ($R_D + r_O$) u uvodu se vidi podijeljen s $(g_m + g_{mb}) \cdot r_O$

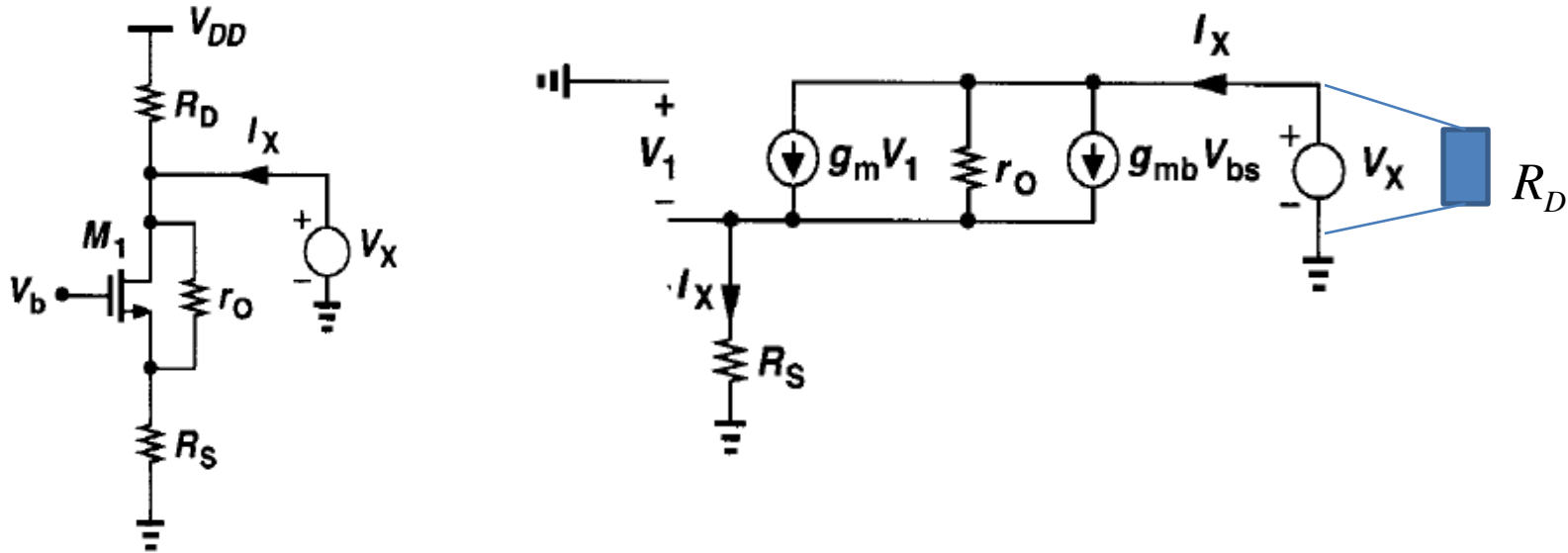
Ulazni otpor je relativno mali ako je otpor u krugu odvoda mali.

Uz R_D koji teži u beskonačno, R_{ul} teži u beskonačno pa je $U_X = U_{ul}$, neovisno o R_S i pojačanje je:

$$A_V \approx 1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O$$



Spoj zajedničke upravljačke elektrode – izlazni otpor



Slično kao za zajednički uvod s uvodskom degeneracijom

$$R_{out} = \left\{ \left[1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_o \right] \cdot R_S + r_o \right\} \parallel R_D$$

Otpor iz uvida preslika se u odvod pojačan naponskim pojačanjem tranzistora

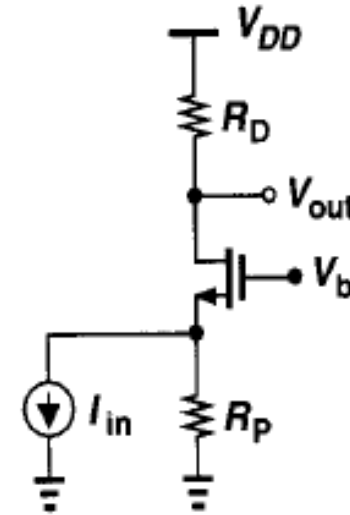
Spoj zajedničke upravljačke elektrode

Ulazni signal spoja zajedničke upravljačke elektrode može biti struja.

Izračunaj pojačanje U_{iz}/I_{ul} te izlazni otpor sklopa na slici, ako strujni izvor na ulazu ima unutarnji otpor R_p .

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{A_V}{\frac{r_O + (g_m + g_{mb})R_p \cdot r_O + R_D + R_p}} R_D \cdot R_p$$

$$R_{out} = \{[1 + (g_m + g_{mb}) \cdot r_O] \cdot R_p + r_O\} \parallel R_D$$



Kaskoda

Kaskada spoja zajedničkog uvoda i spoja zajedničke upravljačke elektrode

M1 – ulazni tranzistor – generira izlaznu struju

M2 – kaskodni tranzistor – struju prosljeđuje trošilu R_D

M1 u zasićenju: $U_X > U_{ul} - U_{GS01} = U_{GS1} - U_{GS01}$

$$U_X = U_b - U_{GS2}$$

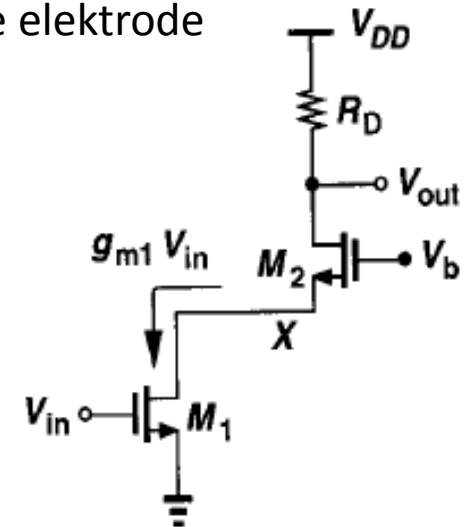
$$\Rightarrow U_b > U_{GS2} + U_{ul} - U_{GS01} = U_{GS2} + U_{GS1} - U_{GS01}$$

M2 u zasićenju: $U_{out} > U_b - U_{GS02}$

Ako odaberemo U_b koji postavi M1 na rub zasićenja: $U_b = U_{GS2} + U_{GS1} - U_{GS01}$

$$\Rightarrow U_{out} > U_{GS2} + U_{ul} - U_{GS01} - U_{GS02} = (U_{GS2} - U_{GS02}) + (U_{GS1} - U_{GS01})$$

Potrebna su barem 2 prenapona upravljačke elektrode da se osigura rad u zasićenju – smanjen hod izlaznog napona



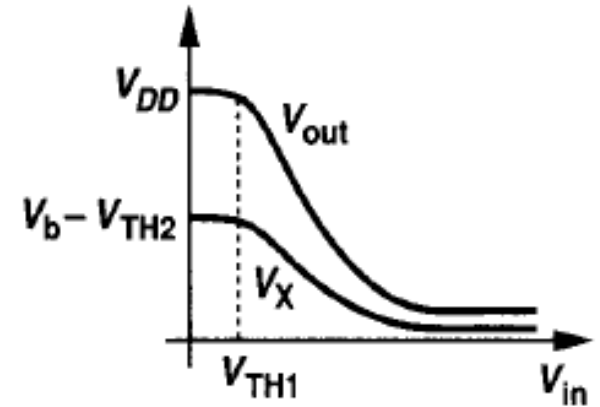
Kaskoda – prijenosna karakteristika

Za $U_{ul} < U_{GS01}$ M1 je u zapiranju i $I_{D1}=0$ pa je i M2 u zapiranju

$$U_{iz} = U_{DD}, \quad U_X = U_b - U_{GS02}$$

Za $U_{ul} > U_{GS01}$ M1 ulazi u zasićenje, I_{D1} raste i U_{iz} opada

Kako $I_{D2} = I_{D1}$ raste, mora se povećavati U_{GS2} pa i U_X opada



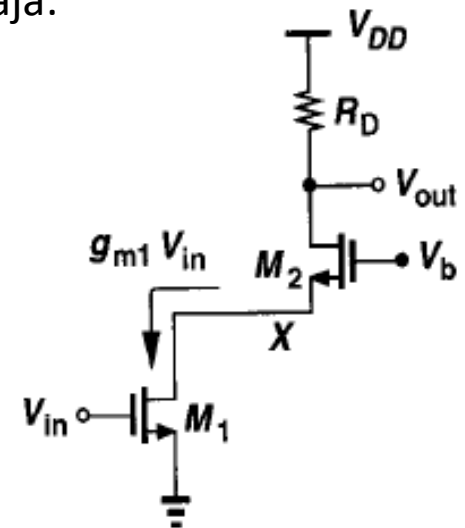
Ako dalje povećavamo U_{ul} struje I_{D1} i I_{D2} rastu i moguća su dva slučaja:

1.) U_{GS2} se poveća toliko da $U_X < U_{ul} - U_{GS01}$ i M1 ulazi u triodno

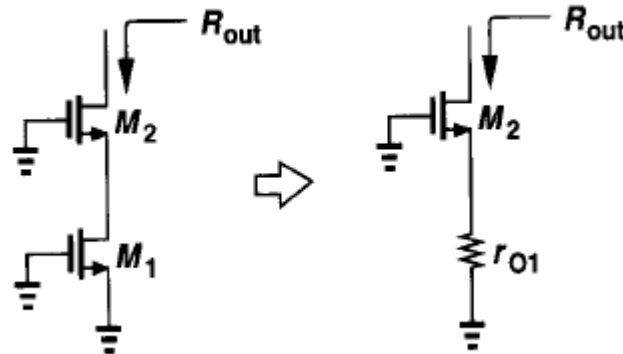
2.) U_{iz} padne toliko da $U_{iz} < U_b - U_{GS02}$ i M2 ulazi u triodno

Ako je U_b mali prvo će M1 otići u triodno

Kada M2 uđe duboko u triodno, U_X i U_{iz} postaju praktički jednaki



Kaskoda – izlazni otpor

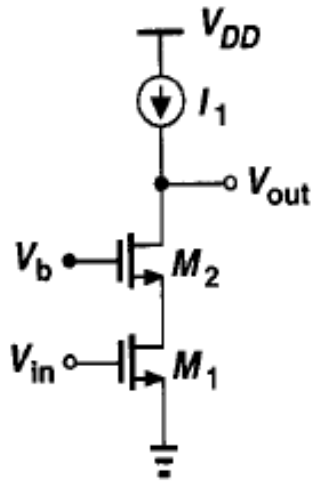


Sklop možemo promatrati kao spoj zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom

$$R_{out} = [1 + (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2}] \cdot r_{O1} + r_{O2}$$

Otpor iz uvoda se u odvod preslika pomnožen s pojačanjem tranzistora M_2

Kaskoda – naponsko pojačanje, približan izraz



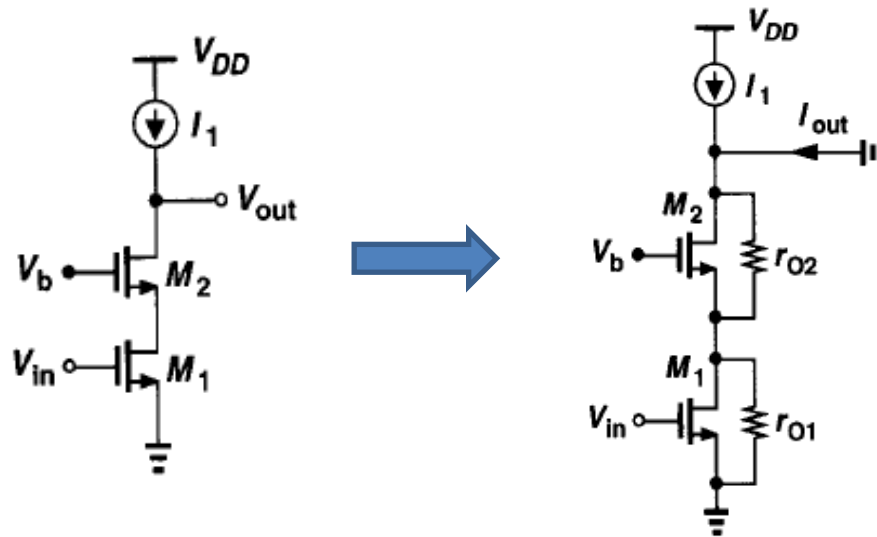
Korištenjem leme koju smo predstavili kod spoja zajedničkog uvoda s uvodskom degeneracijom:

$$G_m \approx g_{m1}$$

$$R_{out} = [1 + (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2}] \cdot r_{O1} + r_{O2} \approx (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2} \cdot r_{O1}$$

$$A_V = -G_m R_{out} = -g_{m1} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2} \cdot r_{O1} = -(g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2} \cdot g_{m1} r_{O1}$$

Kaskoda – naponsko pojačanje, točan izraz



Stvarni G_m je nešto manji od g_{m1} jer se dio izmjenične struje koju generira M1 zatvara kroz r_{O1}

G_m računamo uz kratki spoj na izlazu

$$I_{out} = g_{m1} V_{in} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + R_{in2}} = g_{m1} V_{in} \frac{r_{O1}}{r_{O1} + \frac{1}{g_{m2} + g_{mb2}} \parallel r_{O2}}$$

$$\Rightarrow G_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{g_{m1} \cdot r_{O1} \cdot [r_{O2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) + 1]}{r_{O1} \cdot r_{O2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) + r_{O1} + r_{O2}}$$

Kaskoda – naponsko pojačanje, točan izraz

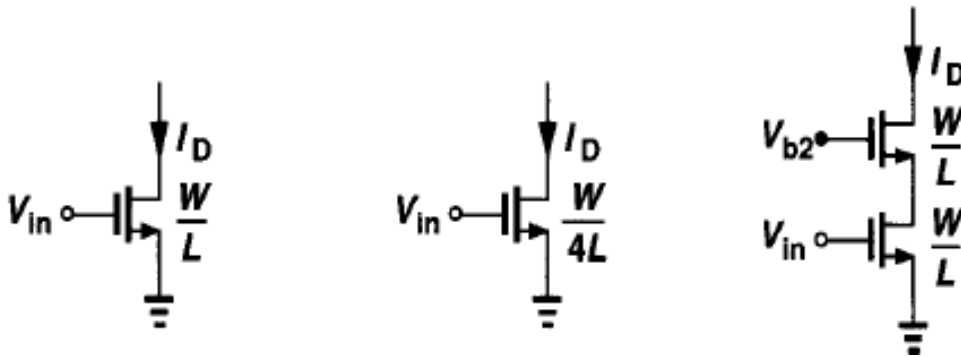
$$A_V = -G_m R_{out} = -\frac{g_{m1} \cdot r_{O1} \cdot [r_{O2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) + 1]}{r_{O1} \cdot r_{O2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) + r_{O1} + r_{O2}} \cdot \{[1 + (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2}] \cdot r_{O1} + r_{O2}\}$$

$$\Rightarrow A_V = -g_{m1} \cdot r_{O1} \cdot [r_{O2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) + 1]$$

Razlika u odnosu na približan izraz je jedinica u zagradi, pa možemo koristiti približan izraz:

$$A_V \approx -(g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2} \cdot g_{m1} r_{O1}$$

Povećanje pojačanja - primjer



Usporediti utjecaj povećanja duljine kanala tranzistora i “kaskodiranja” na pojačanje. Pretpostaviti iste napone u izlaznom krugu.

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

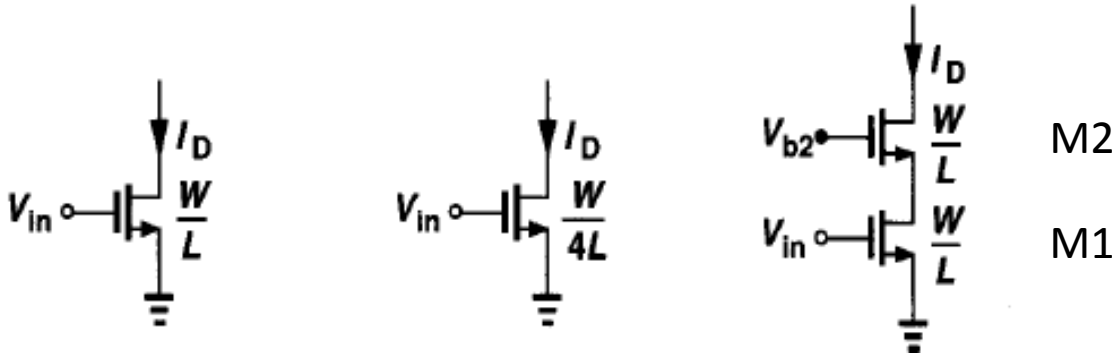
Ako povećamo duljinu kanala L 4x moramo udvostručiti prenapon $U_{GS} - U_{GS0}$ da I_D ostane ista. U tom slučaju isti izlazni napon je potreban kao i za kaskodu da bi tranzistori bili u zasićenju.

Uz povećanje L 4x:

$$g_m r_O = \sqrt{2 \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} I_D} \frac{1}{\lambda I_D}, \quad \lambda \sim \frac{1}{L} \Rightarrow \text{Pojačanje } g_m r_O \text{ poraste } 2x:$$

Pri tome se strmina smanji 2x – raste šum

Povećanje pojačanja - primjer

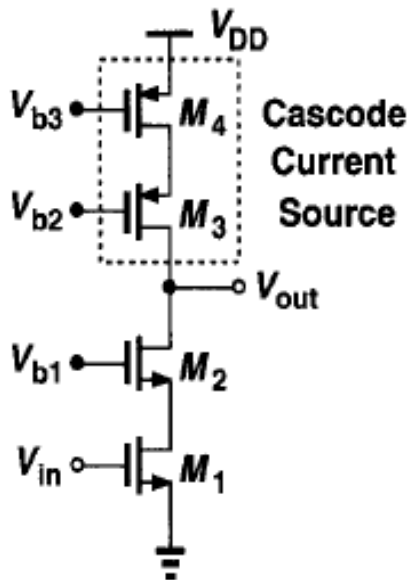


Za kaskodu:

$$A_V \approx -(g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2} \cdot g_{m1} r_{O1} \approx -g_{m1} [(g_{m2} r_{O2}) \cdot r_{O1}]$$

Izlazni otpor je povećan $g_{m2} r_{O1}$ puta, pa i pojačanje za isti faktor
Strmina M1 se ne mijenja kao ni šum

Kaskodni strujni izvor kao opterećenje



Ako su ulazni i kaskodni tranzistor NMOS onda se koristi kaskodni strujni izvor izveden s PMOS tranzistorima.

U drugoj varijanti ako je ulazni tranzistor PMOS, onda se koristi kaskodni izvor s NMOS tranzistorima.

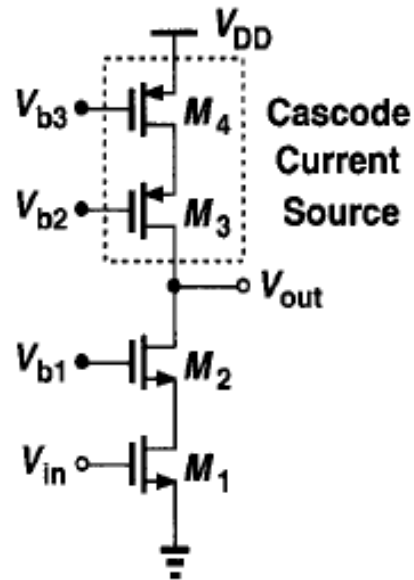
Osnovna ideja je da se u izlaznom čvoru gledajući u odvod M3 vidi veliki dinamički otpor, pa se dobiva veliko pojačanje.

Svi tranzistori moraju biti u zasićenju tako da im se na izlazu mora osigurati napon veći od prenapona $U_{GS} - U_{GS0}$

Maksimalni hod izlaznog napona onda je:

$$\text{hod}(U_{iz}) = U_{DD} - (U_{GS1} - U_{GS01}) - (U_{GS2} - U_{GS02}) - |U_{GS3} - U_{GS03}| - |U_{GS4} - U_{GS04}|$$

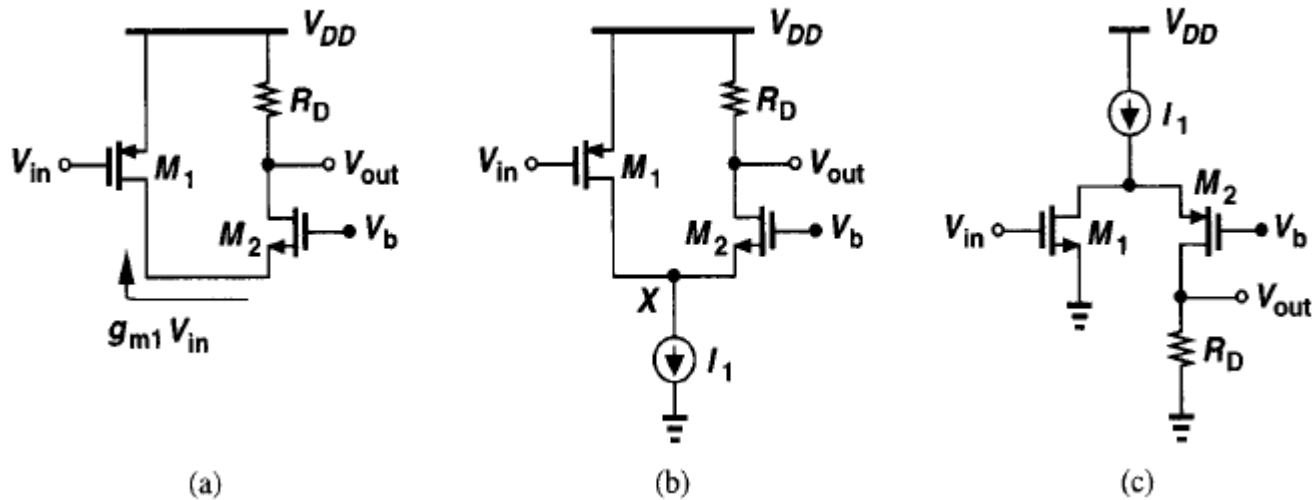
Kaskodni strujni izvor kao opterećenje – R_{iz} i pojačanje



$$R_{out} = \{[1 + (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2}] \cdot r_{O1} + r_{O2}\} \parallel \{[1 + (g_{m3} + g_{mb3}) \cdot r_{O3}] \cdot r_{O4} + r_{O3}\} \approx g_{m2} r_{O2} r_{O1} \parallel g_{m3} r_{O3} r_{O4}$$

$$A_V = -G_m R_{out} \approx -g_{m1} [g_{m2} r_{O2} r_{O1} \parallel g_{m3} r_{O3} r_{O4}]$$

Preklopljena kaskoda



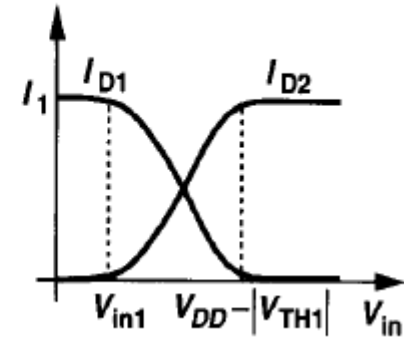
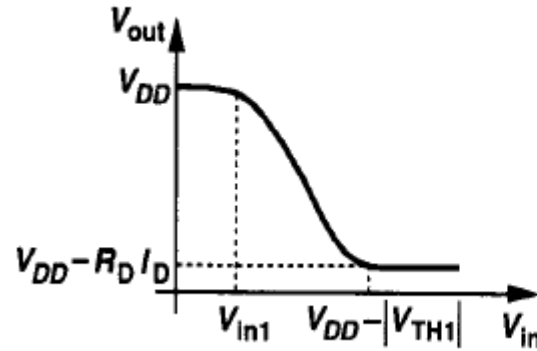
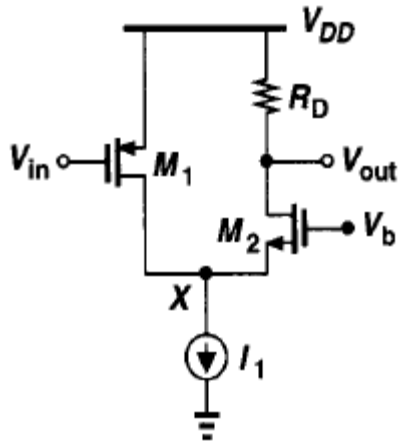
Ideja kaskode je da ulazni tranzistor pretvori napon u struju i prosljedi je kaskodnom tranzistoru. Oba tranzistora su istog tipa (NMOS-NMOS ili PMOS-PMOS)

Ako tranzistori nisu istog tipa možemo napraviti preklopljenu kaskodu:

- a) Osnovna ideja
- b) PMOS ulazni, NMOS kaskodni. Dodan je strujni izvor za propisno napajanje
- c) NMOS ulazni, PMOS izlazni

Struja napajanja mora biti veća da bi se postigle iste karakteristike kao kod kaskode

Preklopljena kaskoda – prijenosna karakteristika



Ako smanjujemo U_{ul} od vrijednosti U_{DD}

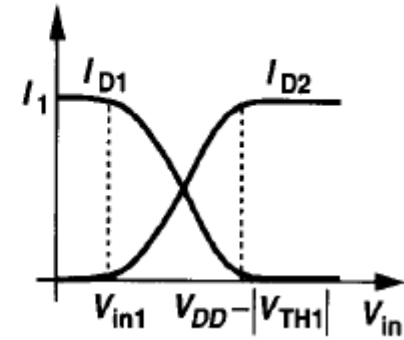
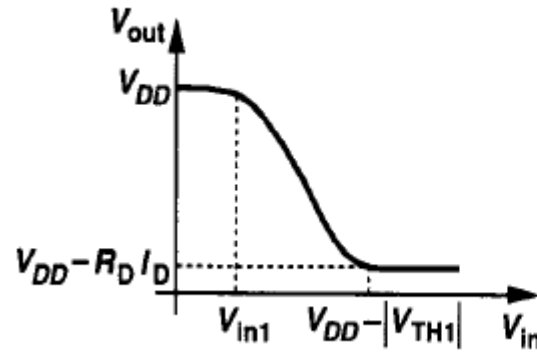
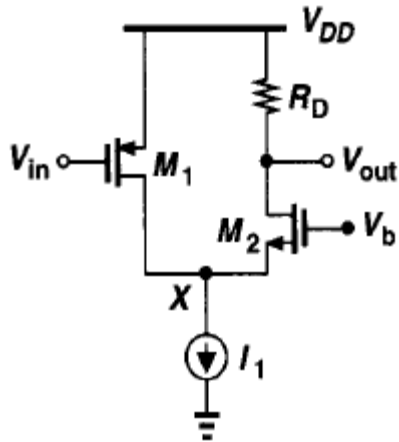
Za $U_{ul} > U_{DD} - |U_{GS01}|$, M1 je isključen i struja I_1 se zatvara kroz M2, $I_{D2}=I_1$, $I_{D1}=0$

a izlazni napon $U_{iz} = U_{DD} - I_D R_D$

Za $U_{ul} < U_{DD} - |U_{GS01}|$, M1 se uključuje, $I_{D1} \uparrow$, $I_{D2} \downarrow$ jer $I_{D1} + I_{D2} = I_1$

A izlazni napon $U_{iz} \uparrow$ jer $I_{D2} \downarrow$

Preklopljena kaskoda – prijenosna karakteristika



Za $U_{ul} < U_{DD} - |U_{GS01}|$

$$I_{D2} = I_1 - \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (U_{DD} - U_{ul} - |U_{GS01}|)$$

Ako dovoljno smanjimo U_{ul} , struja I_1 će se kompletno zatvoriti kroz M1

Onda vrijedi:

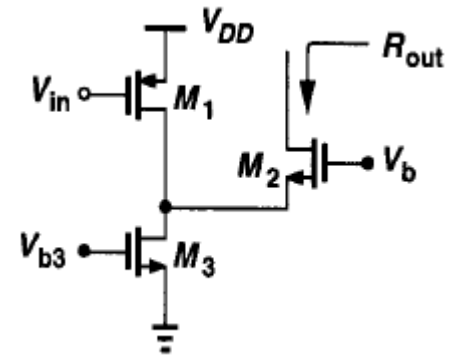
$$I_{D1} = I_1 \Rightarrow \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (U_{DD} - U_{ul1} - |U_{GS01}|) = I_1 \Rightarrow U_{ul1} = U_{DD} - \sqrt{\frac{2I_1}{\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1}} - |U_{GS01}|$$

Za $U_{ul} < U_{ul1}$, M1 ulazi u triodno područje kako bi se zadovoljilo da $I_{D1} = I_1$

Preklopljena kaskoda – primjer

Izračunati izlazni otpor za sklop na slici, gdje M3 radi kao strujni izvor

$$R_{out} = [1 + (g_{m2} + g_{mb2}) \cdot r_{O2}] \cdot (r_{O3} \parallel r_{O1}) + r_{O2}$$



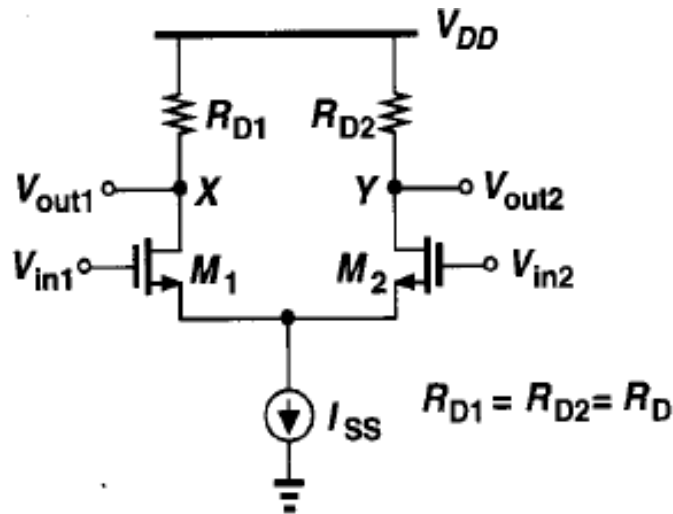
Kako bi povećali pojačanje u prethodnim primerima smo povećavali izlazni otpor

Pol koji je vezan uz izlazni čvor u tom slučaju se nalazi na dosta niskim frekvencijama

Postavlja se pitanje kako to utječe na osjetljivost brzine sklopa o kapacitivnom opterećenju

Visoka izlazna impedancija ne predstavlja problem ako se na pojačalo primjeni odgovarajuća povratna veza !

Diferencijsko pojačalo – osnovni sklop



Napajanje je izvedeno strujnim izvorom I_{SS}

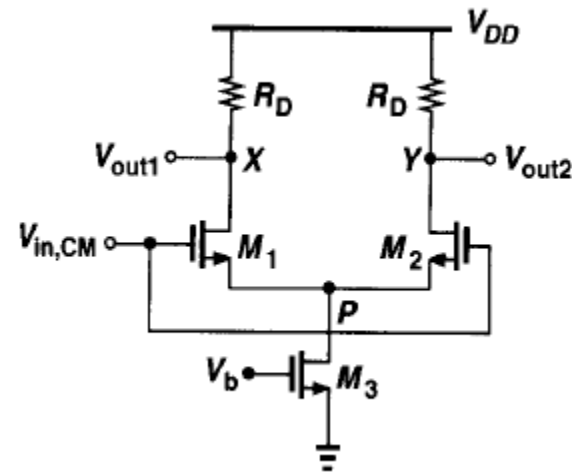
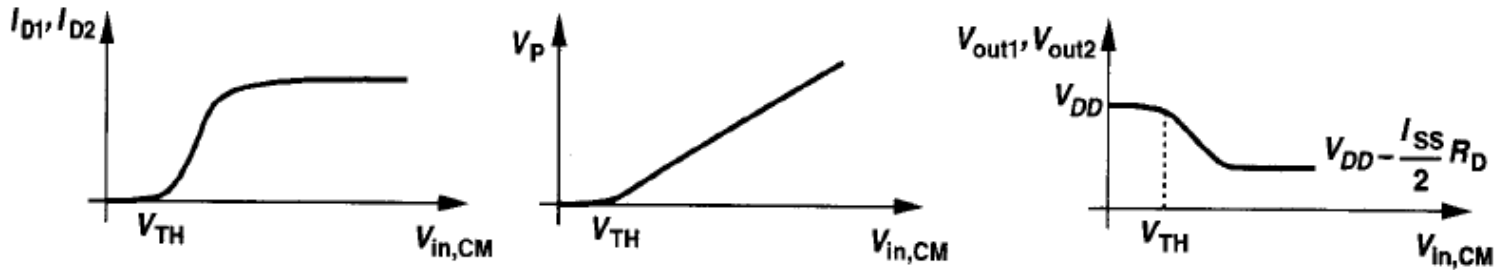
I_{D1} i I_{D2} ne ovise o zajedničkom signalu na ulazu – napon u točki gdje su spojeni uvodi se podesi ovisno o struji I_{SS}

Ako su ulazi na istom potencijalu $U_{ul1} = U_{ul2}$ onda kroz svaku granu teče $I_{SS}/2$

Izlazni zajednički signal je

$$U_{izCM} = U_{DD} - \frac{R_D I_{SS}}{2}$$

Diferencijsko pojačalo –ulazni zajednički signal



Uz $U_{uICM} < U_{GS0}$ M1, M2 su isključen, M3 duboko u triodnom
 $U_{iz1} = U_{iz2} = U_{DD}$

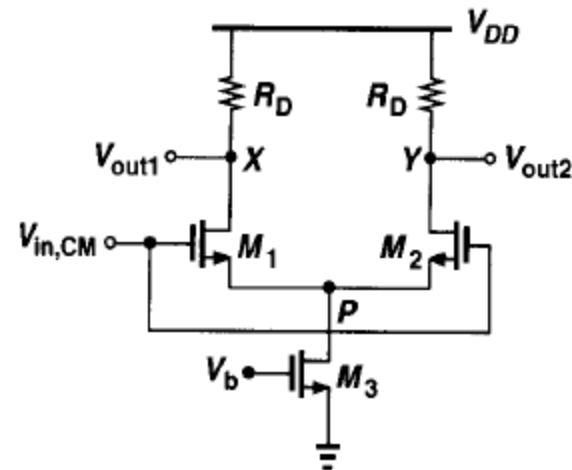
Za $U_{uICM} > U_{GS0}$ M1 i M2 provedu, napon u točki P raste (slijedi U_{uICM}), M3 prolazi kroz triodno područje, struja raste

Kada $U_P > U_b - U_{GS03}$, M3 ulazi u zasićenje i struja više ne raste s U_P .
 Struja I_{SS} se dijeli između dvije grane

$$U_{iz1} = U_{iz2} = U_{DD} - R_D I_{SS} / 2$$

Prema tome za ispravan rad: $U_{uICM} > U_{GS1} + (U_{GS3} - U_{GS03})$

Diferencijsko pojačalo – ulazni zajednički signal



Ako dalje podižemo napon U_{ulCM} kada on postane za U_{GS0} pozitivniji od napona U_{iz} , M_1 i M_2 ulaze u triodno područje

Prema tome, da M_1 i M_2 ne uđu u triodno mora biti zadovoljeno:

$$U_{ulCM} < U_{iz} - U_{GS0} = U_{DD} - \frac{R_D I_{SS}}{2} - U_{GS0}$$

$$U_{DD} - \frac{R_D I_{SS}}{2} - U_{GS0} > U_{ulCM} > U_{GS1} + (U_{GS3} - U_{GS03})$$

Diferencijsko pojačalo – hod izlaznog napona

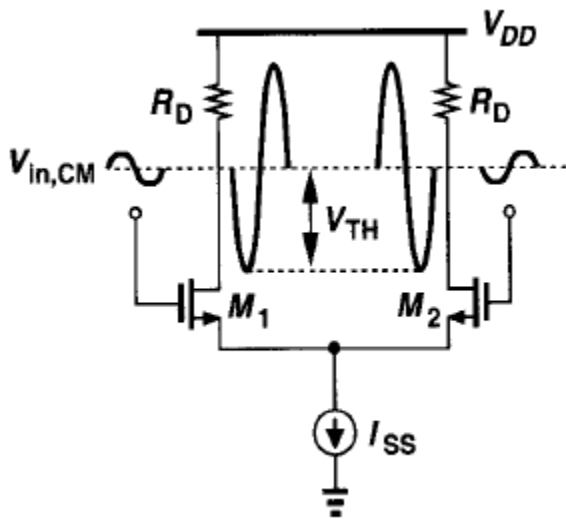
Kako bi M1 i M2 bili u zasićenju izlaz mogu ići gore do V_{DD} i prema dolje do $U_{uICM} - U_{GS0}$

Prema tome, za veći hod poželjno je da je U_{uICM} mali. To često ovisi o prethodnom stupnju.

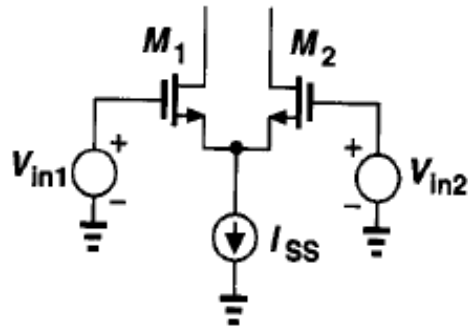
Postoji kompromis između U_{uICM} i pojačanja.

Pojačanje ovisi o padu napona $R_D I_{SS}/2$ (o R_D ovisi izlazni otpor, a $I_{SS}/2$ strmina tranzistora)

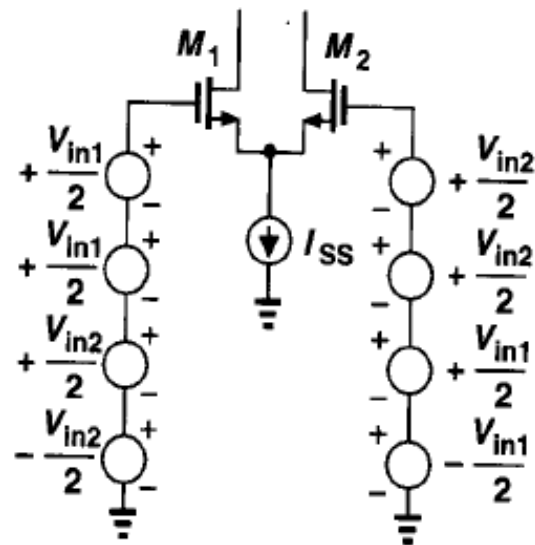
Za veliko pojačanje U_{uICM} mora biti blizu mase.



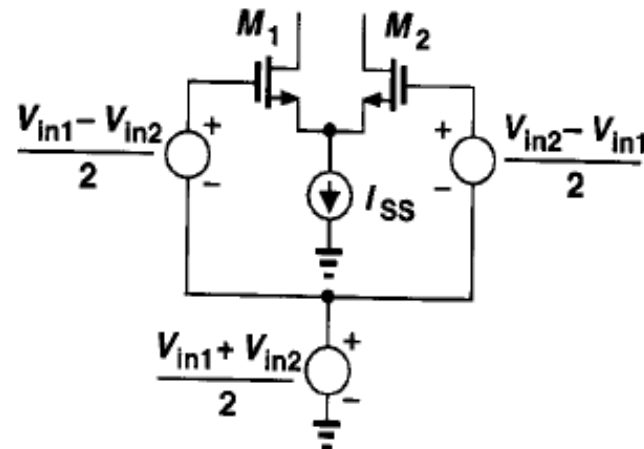
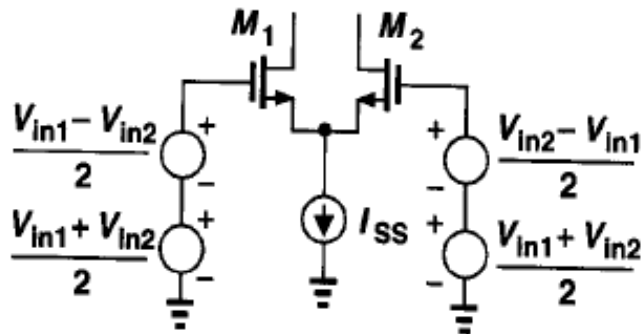
Diferencijsko pojačalo – zajednički i diferencijski signal



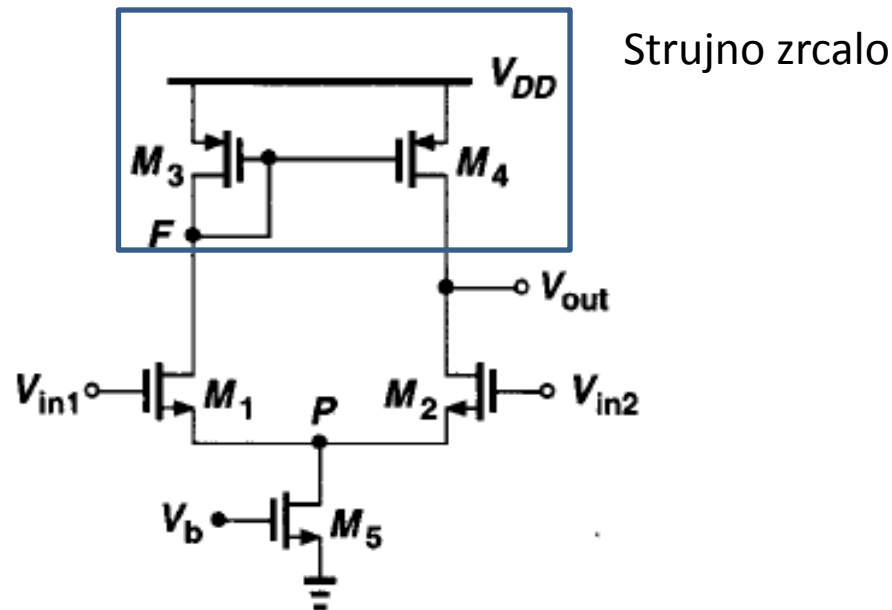
(a)



(b)



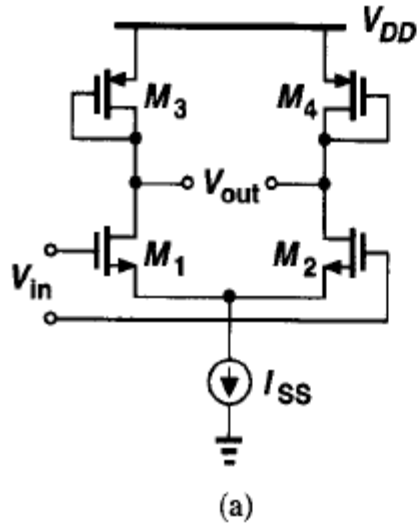
Diferencijsko pojačalo – teret izveden strujnim zrcalom



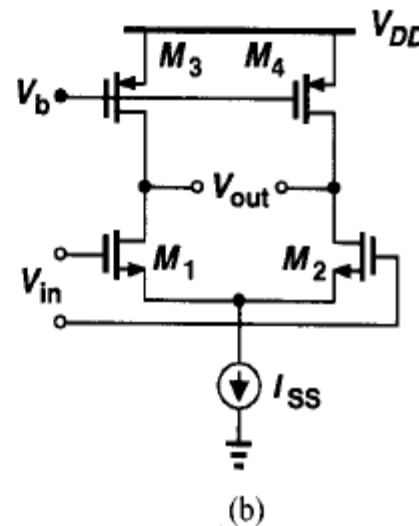
$$|A_v| = g_{m12} (r_{O2} \parallel r_{O4})$$

Diferencijsko pojačalo – teret izveden s tranzistorima

Diodno spojen teret



Strujni izvor



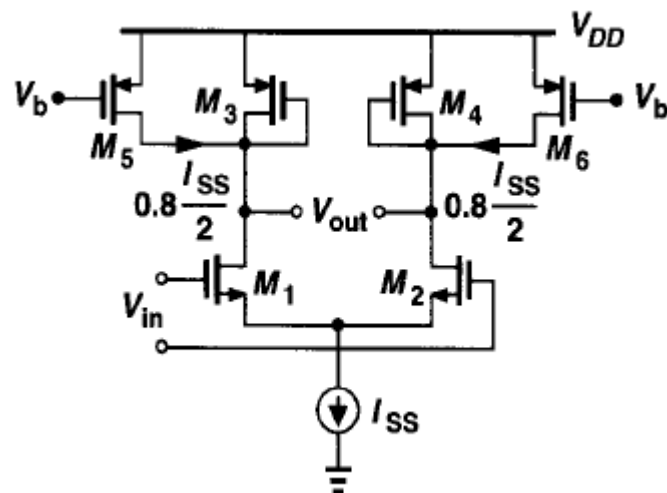
$$A_V = -g_{mN} \left(\frac{1}{g_{mP}} \parallel r_{ON} \parallel r_{OP} \right) \approx -\frac{g_{mN}}{g_{mP}}$$

$$\Rightarrow A_V = -\sqrt{\frac{\mu_n \left(\frac{W}{L} \right)_N}{\mu_p \left(\frac{W}{L} \right)_P}}$$

$$A_V = -g_{mN} (r_{ON} \parallel r_{OP})$$

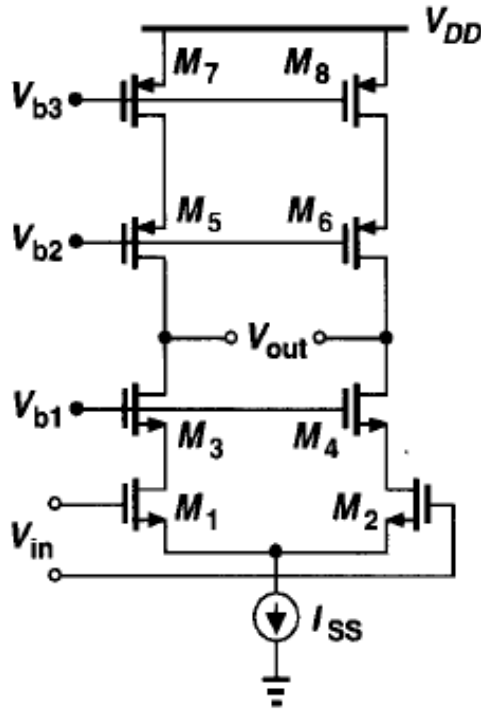
Potrebno je dovesti napon V_b koji se generira sklopom za napajanje

Diferencijsko pojačalo – diodno spojen teret, povećanje pojačanja



$$A_V \approx -\frac{g_{mN}}{g_{mP}} = -\sqrt{\frac{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_N \frac{I_{SS}}{2}}{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_P \frac{0.2 I_{SS}}{2}}} - \sqrt{5 \cdot \frac{\mu_n \left(\frac{W}{L}\right)_N}{\mu_p \left(\frac{W}{L}\right)_P}}$$

Diferencijsko pojačalo – kaskoda



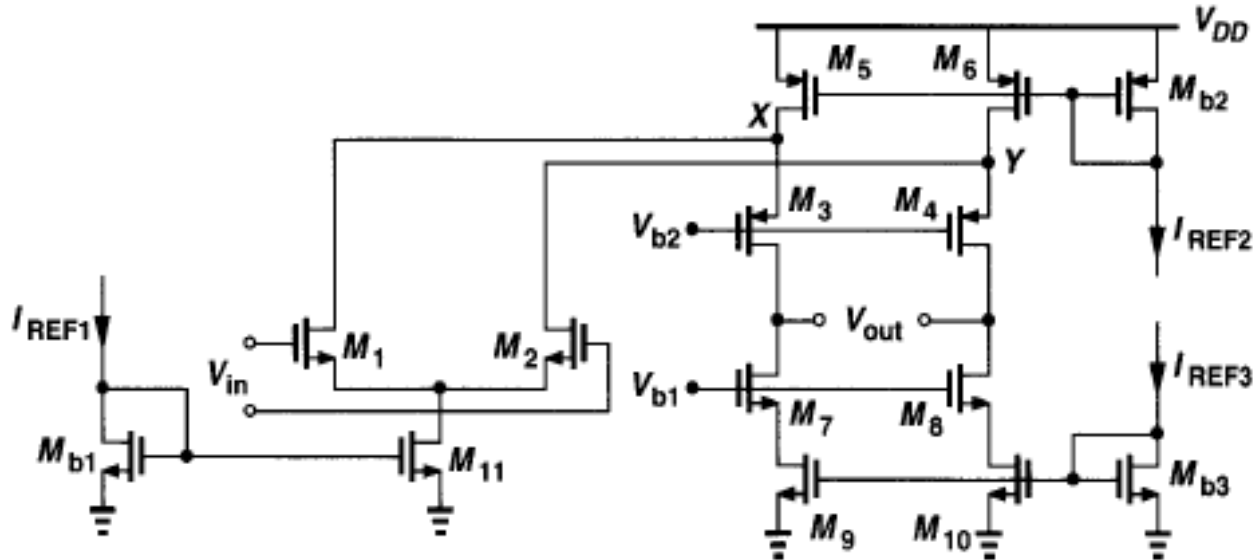
$$A_V = -g_{m12} R_{out} \approx -g_{m12} (g_{m3} r_{O3} r_{O1} \parallel g_{m5} r_{O5} r_{O7})$$

Potrebno je dovesti generirati napone V_{b1} , V_{b2} , V_{b3} , te odabrati V_{inCM}

$$U_{ulCM} > U_{ODSS} + U_{GS1,2} = U_{ODSS} + U_{OD1,2} + U_{GS01,2}$$

$$U_{ulCM} < U_{b1} - U_{GS3,4} + U_{GS01,2} = U_{b1} - (U_{OD3,4} + U_{GS03,4}) + U_{GS01,2}$$

Diferencijsko pojačalo – preklopljena kaskoda



$$A_V = -g_{m12}R_{out} \approx -g_{m12}[g_{m3}r_{O3}(r_{O5}\|r_{O1})\|g_{m7}r_{O7}r_{O9}]$$

Potrebno je dovesti generirati napone V_{b1} , V_{b2}

Odabir V_{inCM} ne predstavlja problem kod projektiranja

$$U_{ulCM} > U_{OD11} + U_{GS1,2} = U_{OD11} + U_{OD1,2} + U_{GS01,2}$$

$$U_{ulCM} < U_{XY} + U_{GS01,2} = U_{DD} - U_{OD5,6} + (U_{OD1,2} + U_{GS01,2})$$

S jedne strane praktički nije ograničen - može ići do U_{DD}

Operacijska pojačala - pojačanje

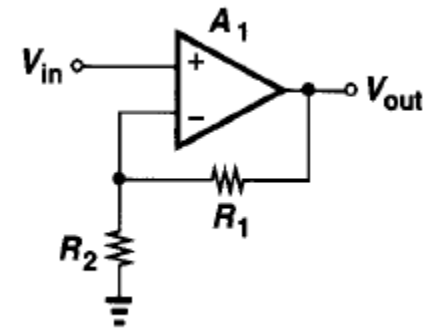
Pojačanje

Pojačanje otvorene petlje određuje preciznost sklopa uz primjenjenu negativnu povratnu vezu.

U kompromisu je s brzinom (širinom frekvencijskog pojasa), hodom izlaznog napona. Obično je potrebno zadovoljiti minimalno pojačanje

Primjer:

U sklopu na slici nominalno pojačanje je 10 odnosno $1 + R_1/R_2 = 10$.
Odrediti minimalno pojačanje A_1 za pogrešku pojačanja od 1%



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_1}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{A_1}{\frac{R_1 + R_2}{R_2} + A_1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_1 R_2}} \approx$$

$$\approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{A_1 R_2}\right)$$

Pogreška pojačanja

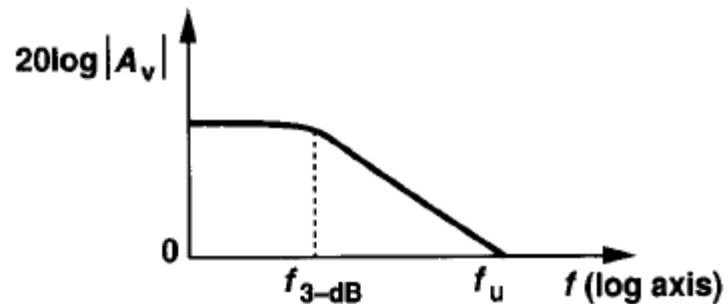
$$\frac{R_1 + R_2}{A_1 R_2} < 0.01 \Rightarrow A_1 > \frac{1}{0.01} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 100 \cdot 10 = 1000$$

Operacijska pojačala – širina frekvencijskog područja

Širina frekvencijskog pojasa za mali signal (eng. Small-signal bandwidth)

Na visokim frekvencijama pojačanje otvorene petlje opada te dovodi do pogreške pojačanja u sklopu uz zatvorenu povratnu vezu.

Obično se opisuje frekvencijom jediničnog pojačanja f_u

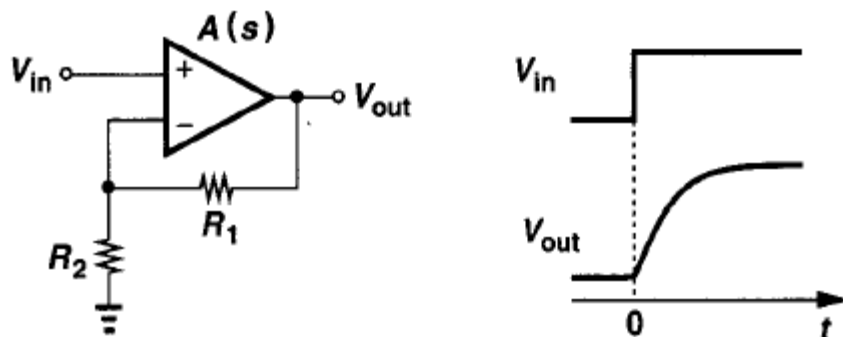


Operacijska pojačala – širina frekvencijskog područja

Primjer:

U sklopu na slici nominalno pretpostaviti da je OP naponsko pojačalo s jednim polom. Ako je V_{in} skokovita pobuda male amplitude, izračunati vrijeme potrebno da izlaz postigne vrijednost unutar 1% konačne vrijednosti. Kolika mora biti frekvencija jediničnog pojačanja ako je $1+R_1/R_2=10$ i vrijeme smirivanja manje od 5 ns.

Prepostaviti da je pojačanje puno veće od 1.



Operacijska pojačala – širina frekvencijskog područja

$$\left(V_{in} - V_{out} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) A(s) = V_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{A(s)}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A(s)}, \quad A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0} = \boxed{\frac{A_0}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0\right) \omega_0}} \text{ Pol}$$

Pojačanje zatvorene
petlje

$$\tau = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0\right) \omega_0}$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} A_0 \gg 1 \Rightarrow \tau = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{\boxed{A_0 \omega_0}}$$

Frekv. jediničnog
pojačanja

Operacijska pojačala – širina frekvencijskog područja

Odziv na skokovitu pobudu

$$V_{in} = a \cdot S(t)$$

$$V_{out} = a \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right) \cdot S(t)$$

Konačna vrijednost V_{out} :

$$V_F = a \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \Rightarrow 1 - \exp \left(-\frac{t_{1\%}}{\tau} \right) = 0.01$$

$$t_{1\%} = \tau \ln 100 = 4.6\tau$$

Uz vrijeme smirivanja $t_{1\%} = 5 \text{ ns}$

$$\tau = \frac{t_{1\%}}{4.6} = \frac{5}{4.6} = 1.09 \text{ ns} \Rightarrow A_0 \omega_0 = \frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)}{\tau} = 9.2 \cdot 10^9 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (1.46 \text{ GHz})$$

Širina pojasa ovisi i o željenoj točnosti i pojačanju u zatvorenoj petlji !!

Širina frekvencijskog područja za veliki signal

U mnogim aplikacijama OP rade s velikim tranzijentnim signalima – nelinearni režim rada. Nije dovoljan opis sa širinom frekvencijskog pojasa za mali signal.

Primjer: Pojačalo iz prethodnog primjera koristi realno OP koje ima konačnu izlaznu impedanciju i na izlazu “drive-a” kapacitivno opterećenje. Kako se sklop ponaša ako na ulazu primjenimo skokovitu pobudu amplitude 1 V ?

Kako se izlaz ne može trenutno promijeniti u trenutku $t \geq 0$ na ulazu se nalazi diferencijski napon od 1V. Takav diferencijski napon napon tjera OP u nelinearan režim. U suprotnom bi uz pojačanje 1000, Uiz trenutno postigao vrijednost 1000V .

Izlaz je ograničen brzinom porasta izlaznog napona (eng. Slew rate)

Ostali parametri OP

Hod izlaznog napona

Obično se zahtijeva veliki hod napona

Diferencijski izlaz osigurava “komplementarne izlaze” te udvostručava hod napona

U kompromisu je s dimenzijama tranzistora i strujama napajanja i prema tome s brzinom.

Postizanje velikog hoda je jedno od osnovnih izazova u projektiranju OP.

Linearnost

Pojačala u otvorenoj petlji pate od nelinearnosti.

Dva pristupa u smanjenju nelinearnosti:

- Potpuno diferencijska pojačala (eliminiraju 2.harmonik)
- Primjena negativne povratne veze

Šum i napon pomaka

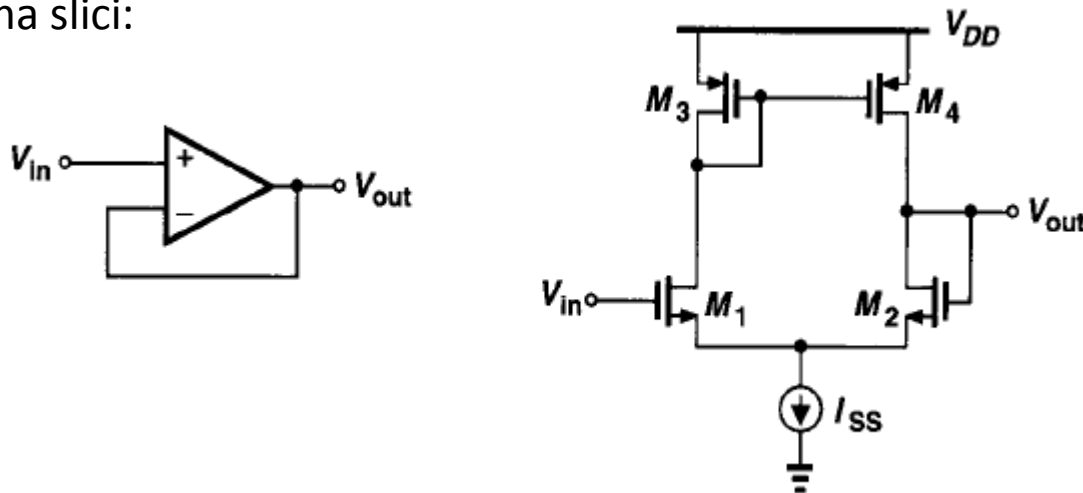
Određuju minimalnu razinu signala na ulazu koji se može obraditi

Potiskivanje napajanja

Koriste se u sklopovima miješanog signala i ponekad koriste šumovite digitalne napone napajanja. Poželjne su potpuno diferencijske topologije. Veći faktor potiskivanja.

Jednostupanjska OP

Primjer: Izračunaj hod ulaznog zajedničkog signala i izlazni otpor u zatvorenoj petlji za sljedilo na slici:



Minimalni ulazni napon određuje pad napona potreban za I_{SS} te napon V_{GS1} ulaznog tranzistora:

$$V_{in,min} > V_{CSS} + V_{GS1}$$

Maksimalni ulazni napon je određen ulaskom M1 u triodno područje:

$$V_{in,max} < V_{DD} - |V_{GS3}| + V_{TH1}$$

Ako svi tranzistori imaju prenapon $V_{GS} - V_{TH} = 0.3V$ i iznos napona praga $V_{TH} = 0.7$

$$V_{in,min} = V_{CSS} + V_{GS1} = 0.3 + 0.7 + 0.3 = 1.3V$$

$$V_{in,max} = 3 - |0.3 + 0.7| + 0.7 = 2.7V$$

$$\Delta V_{in,max} = 1.4V$$

Jednostupanjska OP

Izlazni otpor:

Naponska povratna veza smanjuje izlazni otpor.

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_0}$$

Pojačanje i izlazni otpor u otvorenoj petlji:

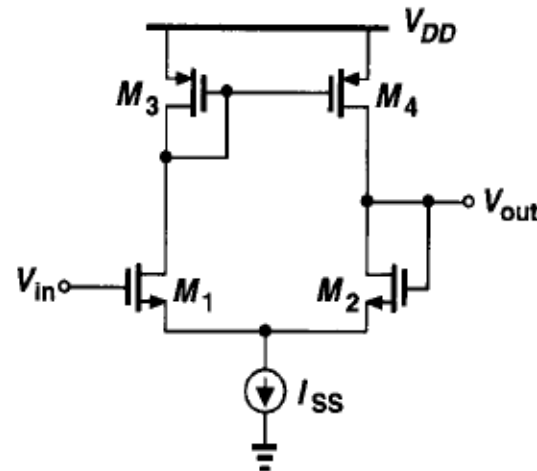
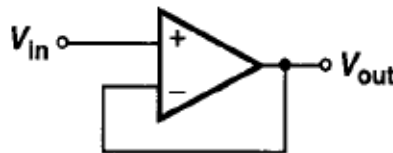
$$A_0 = g_{mN}(r_{O2} \parallel r_{O4}), \quad R_{iz} = r_{O2} \parallel r_{O4}$$

Izlazni otpor sa zatvorenim petljom

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_0} = \frac{r_{O2} \parallel r_{O4}}{1 + g_{mN}(r_{O2} \parallel r_{O4})} \approx \frac{1}{g_{mN}}$$

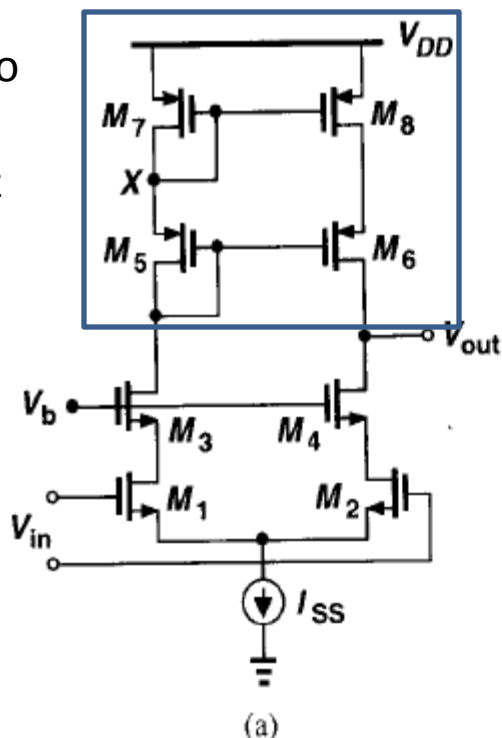
Izlazni otpor u zatvorenoj petlji slabo ovisi o izlaznom otporu u otvorenoj petlji.

Možemo “nabrijati” pojačanje povećanjem izlaznog otpora u otvorenoj petlji i da pri tome postignemo mali izlazni otpor u zatvorenoj petlji !!!!

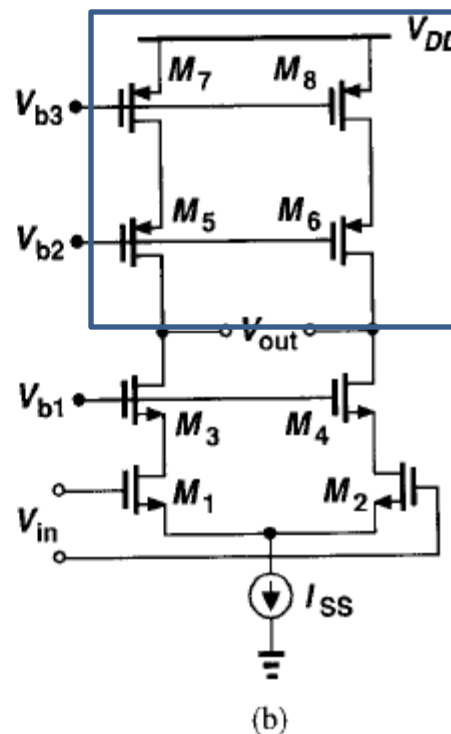


Jednostupanjska OP - kaskoda

Kaskodno strujno
zrcalo –
asimetričan izlaz



Kaskodno strujni
izvor – simetričan
izlaz

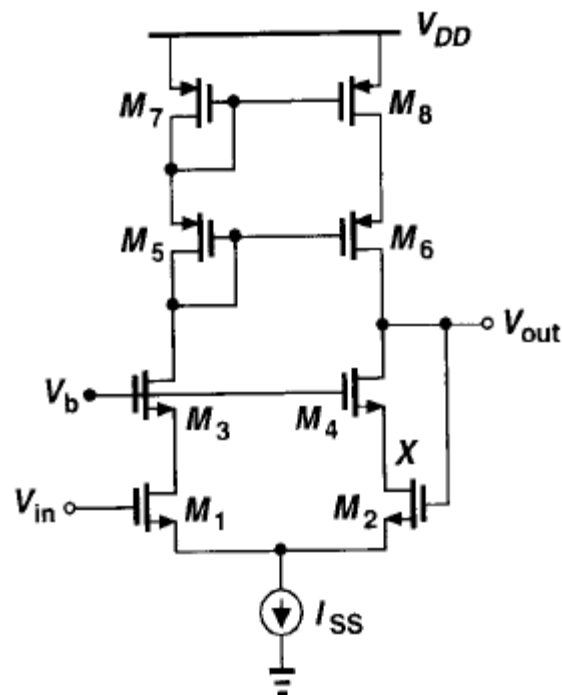


Kaskodom se postiže veliko pojačanje tako da se poveća izlazni otpor.
Pol vezan uz izlazni čvor je na relativno niskim frekvencijama-ovisi o kapacitivnom opterećenju.

Potpuno diferencijski izlaz

- Veći hod za $2U_{GSO}$ jer M5 i M7 nisu diodno spojeni
- dvostruko veći hod napona u odnosu na asimetrični izlaz
- bolja linearnost zbog potiskivanja 2.harmonika

Jednostupanjska OP – kaskoda, spoj sljedila



Jedno od loših svojstava kaskodnih OP je problem spajanja u sljedilo.

V_{in} i V_{out} su u fazi (V_{in} je “+” stezaljka OP-a)

Koji uvjet mora biti zadovoljen da M2 i M4 budu u zasićenju .

$$U_{iz} \leq U_x + U_{GS02}, \quad U_x = U_b - U_{GS4} \Rightarrow U_{iz} \leq U_b - U_{GS4} + U_{GS02}$$

$$U_b \leq U_{iz} + U_{GS04} \Rightarrow U_{iz} \geq U_b - U_{GS04}$$

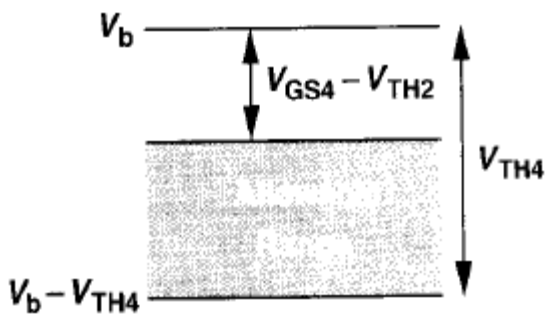
Odnosno:

$$U_b - U_{GS04} \leq U_{iz} \leq U_b - U_{GS4} + U_{GS02}$$

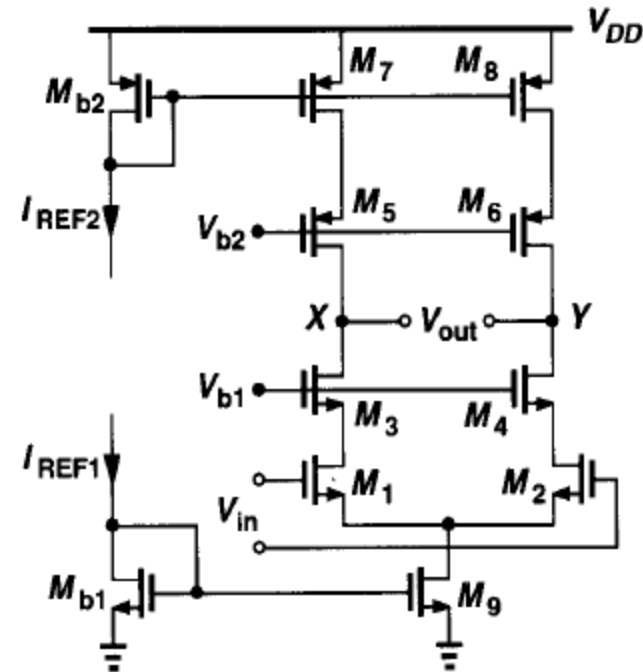
Dozvoljeni hod izlaznog napona je:

$$\Delta U_{iz} = U_b - U_{GS4} + U_{GS02} - (U_b - U_{GS04}) = U_{GS02} - (U_{GS4} - U_{GS04})$$

Može se povećati smanjenjem prenapona M4, ali uvijek je manje od U_{GS02}

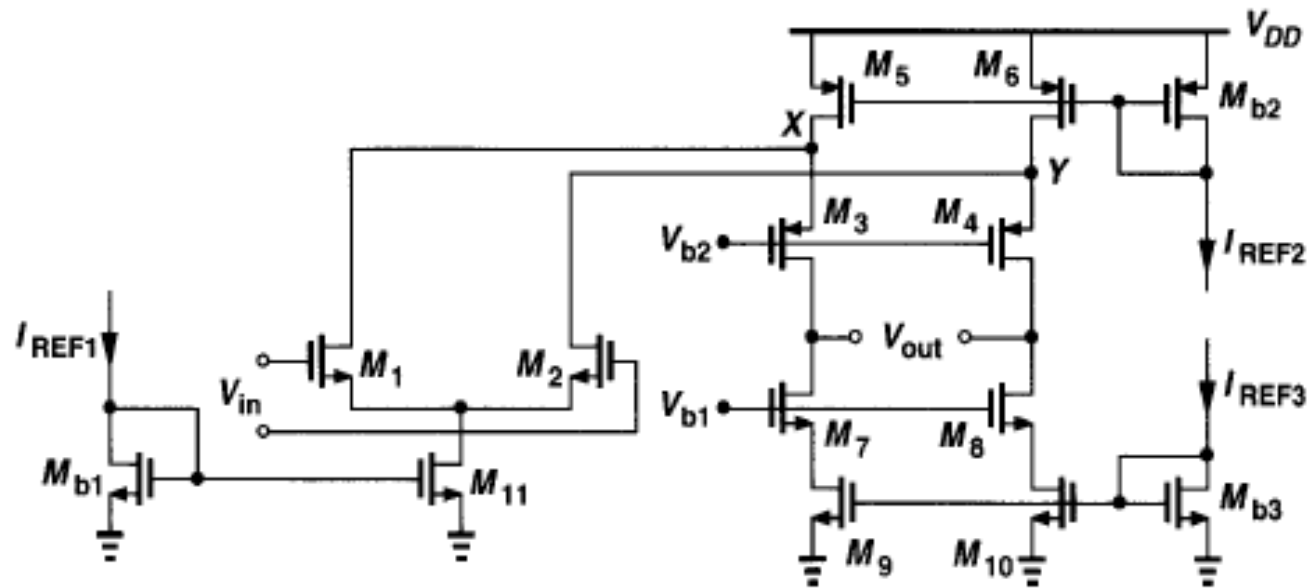


Primjer – projektiranje kaskodnog OP



Treba isprojektirati potpuno diferencijsko teleskopsko OP sa sljedećim specifikacijama: $V_{DD}=3\text{ V}$, diferencijski hod napona 3V, disipacija snage 10 mW, naponsko pojačanje 2000. Pretpostaviti $\mu_n C_{ox}=60\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $\mu_p C_{ox}=30\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $\lambda_n=0.1\text{ V}^{-1}$, $\lambda_p=0.2\text{ V}^{-1}$ (za efektivnu duljinu kanala $0.5\text{ }\mu\text{m}$), $\gamma=0$ (zanemarujemo efekt podloge), $U_{GS0n}=|U_{GS0p}|=0.7\text{ V}$

Primjer – projektiranje preklopljene kaskode



Treba isprojektirati potpuno diferencijsko OP u konfiguraciji preklopljene kaskode sa sljedećim specifikacijama: $V_{DD}=3$ V, diferencijski hod napona 3V, disipacija snage 10 mW, naponsko pojačanje 2000. Pretpostaviti $\mu_n C_{OX}=60 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $\mu_p C_{OX}=30 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $\lambda_n=0.1 \text{ V}^{-1}$, $\lambda_p=0.2 \text{ V}^{-1}$ (za efektivnu duljinu kanala $0.5 \mu\text{m}$), $\gamma=0$ (zanemarujemo efekt podloge), $U_{GS0n}=|U_{GS0p}|=0.7 \text{ V}$

Usporedba kaskode i preklopljene kaskode

Hod izlaznog napona:

$$\text{hod}(U_{iz}) = U_{DD} - U_{ODSS} - U_{OD1} - U_{OD3} - |U_{OD5}| - |U_{OD7}| \quad \text{kaskoda}$$

$$\text{hod}(U_{iz}) = U_{DD} - U_{OD1} - U_{OD3} - |U_{OD5}| - |U_{OD7}| \quad \text{preklopljena kaskoda}$$

Hod je malo veći kod preklopljene kaskode – U_{ODSS} je razlika

Pol u točki preklapanja (X i Y) je veći zbog dodatnih kapaciteta (M1, M3 i M5), pogotovo jer M5 ima velike dimenzije zbog veće struje – manja širina frekvencijskog pojasa

Šumu kod preklopljene kaskode doprinose: (M1-M2, M5-M6, M9-M10)

Šumu kod kaskode doprinose: (M1-M2, M7-M8)

Šum je veći kod preklopljene kaskode.

Odabir ulaznog zajedničkog signala (U_{ulCM}) i spajanje u sljedilo puno bolje kod preklopljene kaskode – zbog toga se čak i češće koristi preklopljena kaskoda

Usporedba kaskode i preklopljene kaskode

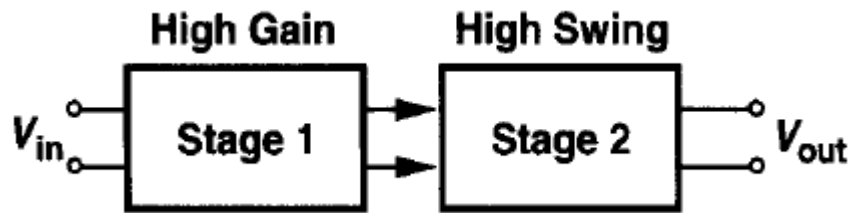
	Kaskoda	Preklopljena kaskoda
Hod U_{iz}	malo manji	malo veći
A_v	veće	manje
disipacija	manja	veća
Šum	manji	veći
Širina frekv. pojasa	veća	manja
Odabir ulaznog zajedničkog signala (U_{ulCM})	ograničeno	jednostavno
Spajanje u sljedilo	Ograničen izlazni hod	jednostavno

Dvostupanjska OP

U nekim primjenama pojačanje i/ili hod izlaznog napona nisu zadovoljavajući.

Npr. slušni aparat mora raditi s naponom napajanja 0.9V i osigurati 0.5V hoda izlaznog napona.

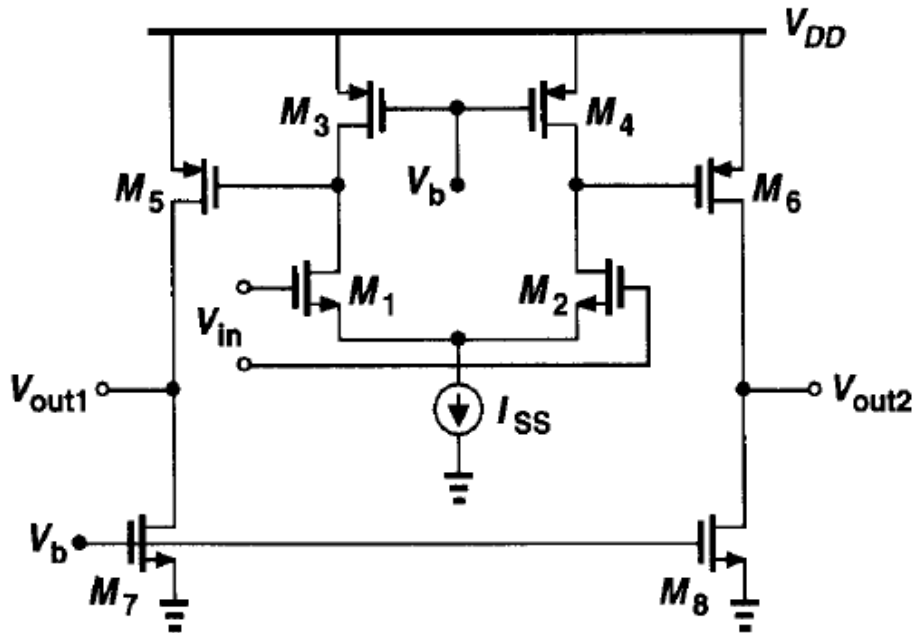
Tada se koriste dvostupanjska pojačala koja izoliraju zahtjeve za veliko pojačanje i hod napona – prvi stupanj osigurava veliko pojačanje, a drugi veliki hod napona



Svaki stupanj pojačala može koristiti bilo koju konfiguraciju.

Izlazni stupanj obično se izvodi sa spojem zajedničkog uvoda kako bi se osigurao maksimalni hod.

Dvostupanjska OP – primjer 1



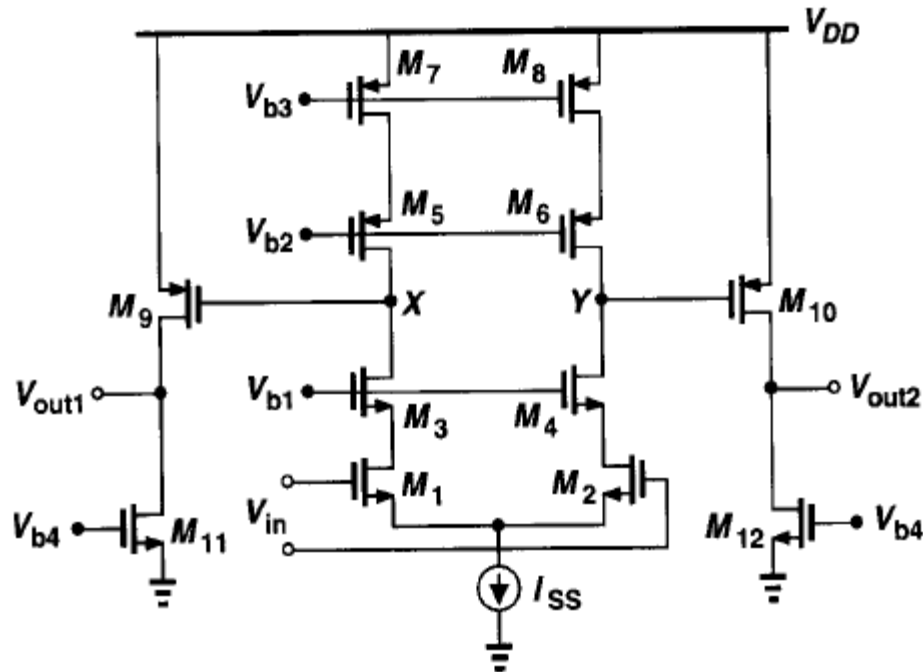
Prvi stupanj – diferencijsko pojačalo sa strujnim izvorom kao teretom

Drugi stupanj – spoj zajedničkog uvida

$$A_V = (g_{m1} + g_{mb1}) \cdot (r_{O1} \parallel r_{O3}) \times g_{m5} (r_{O5} \parallel r_{O7}) \approx g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{O3}) \times g_{m5} (r_{O5} \parallel r_{O7})$$

$$\text{hod}(U_{iz1,2}) = U_{DD} - U_{OD7,8} - |U_{OD5,6}|$$

Dvostupanjska OP – primjer 2



Prvi stupanj – teleskopsko (kaskoda)

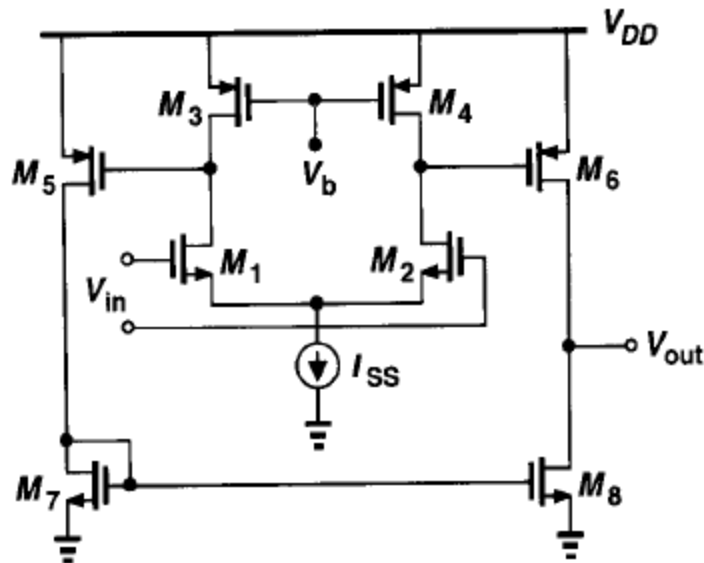
Drugi stupanj – spoj zajedničkog uvoda

$$|A_V| \approx \{g_{m1}[(g_{m3}r_{O3}) \cdot r_{O1} \parallel (g_{m5}r_{O5}) \cdot r_{O7}]\} \times g_{m9}(r_{O9} \parallel r_{O11})$$

$$\text{hod}(U_{iz1,2}) = U_{DD} - U_{OD11,12} - |U_{OD9,10}|$$

Pojačanje drugog stupnja je dovoljno veliko da hod napona U_{xy} bude mali

Dvostupanjska OP – asimetričan izlaz



M5 i M6 pretvaraju napon sa izlaza prvog stupnja u struje (protufazne)
 Strujno zrcalo M7-M8 generira asimetričan izlaz.
 M8 kopira struju M7, struje se zbroje u izlaznom čvoru i stvaraju U_{iz} na izlaznom otporu $r_{o8} || r_{o6}$

Ako spojimo pojačalo u spoj sljedila – G(M1) na U_{iz2} onda je hod izlaznog napona limitiran s donje strane na:

$$hod(U_{iz}) = hod(U_{iz2}) = U_{ODSS} + U_{GS1} = U_{ODSS} + U_{GS01} + U_{OD1}$$

Dvostupanjska OP – frekvencijski odziv

Dodavanje stupnja pojačala unosi dodatni pol u frekvencijskoj karakteristici pojačala u otvorenoj petlji.

Kada se koristi takvo OP sa zatvorenom petljom povratne veze pojačalo može postati nestabilno.

Takva pojačala zahtijevaju frekvencijsku kompenzaciju.

Povećanje pojačanja

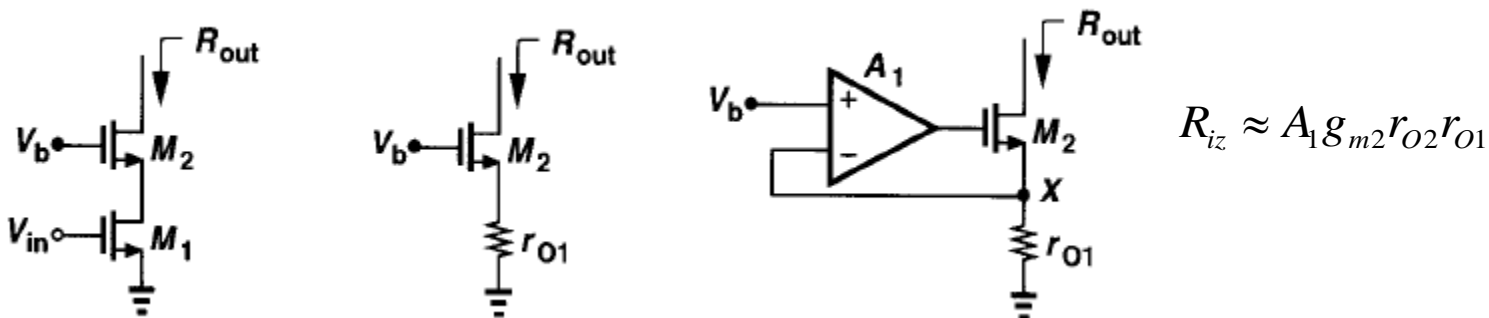
Eng. Gain boosting

Teleskopsko OP i preklopljena kaskoda postižu veliko pojačanje zbog velikog izlaznog otpora.

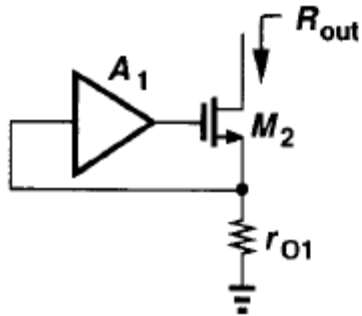
Kod tehnike povećanja pojačanja korištenjem **strujne negativne povratne veze** može se povećati izlazni otpor.

Izlazna struja stvara pad napona na r_{O1} te se M2 postavlja u strujnu-serijsku povratnu vezu. Promjene izlaznog napona imaju slabiji utjecaj na U_X jer A1 regulira taj napon.

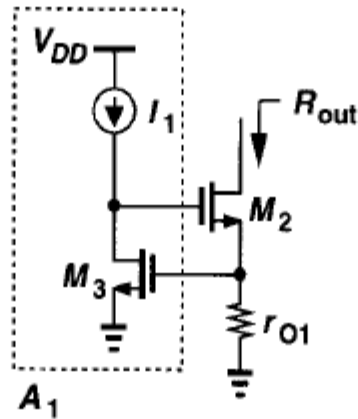
Pri tome hod napona nije znatno smanjen.



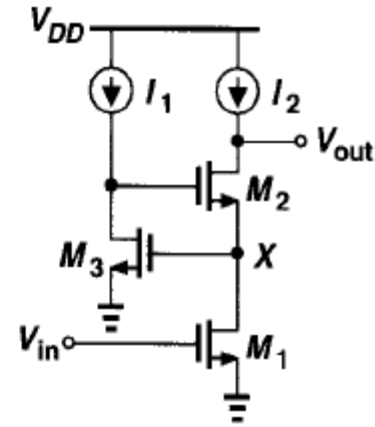
Povećanje pojačanja – moguća izvedba



(a)



(b)



(c)

$$A_V \approx g_{m1}(g_{m2}r_{O2}r_{O1})(g_{m3}r_{O3})$$

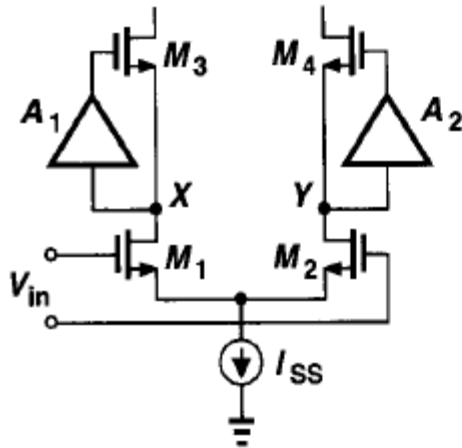
Hod izlaznog napona:

Najniži napon: $U_{iz,min} = U_{OD2} + U_{GS3}$

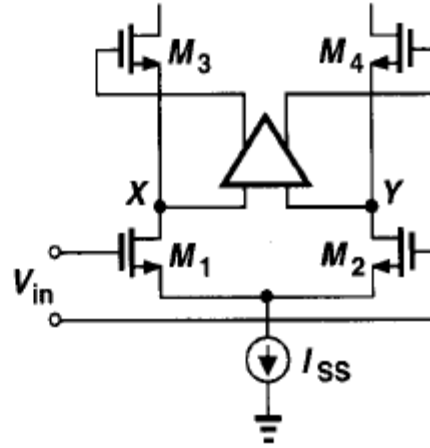
Kod obične kaskode nešto niži:

$$U_{iz,min} = U_{OD2} + U_{OD1}$$

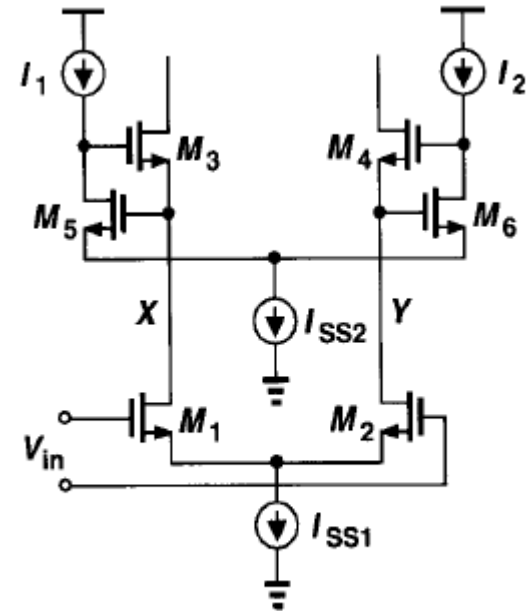
Povećanje pojačanja – potpuno diferencijska kaskoda



(a)



(b)



(c)

Dva asimetrična pomoćna pojačala zamjenjuju se jednim diferencijskim

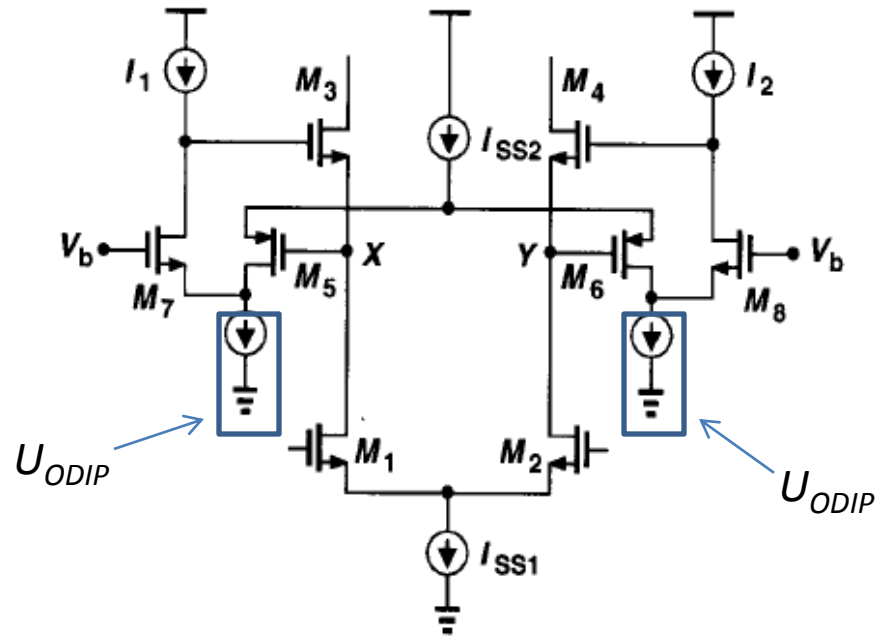
Najniži napon na izlazu: $U_{iz,min} = U_{OD3,4} + U_{GS5,6} + U_{ODSS}$

Kod obične diferencijalne kaskode nešto veće zbog korištenja NMOS tranzistora :

$$U_{iz,min} = U_{OD3,4} + U_{OD1,2} + U_{ODSS} = U_{OD3,4} + (U_{GS1,2} - U_{GS01,2}) + U_{ODSS}$$

Razlika je za jedan napon praga

Preklopljena kaskoda kao pomoćno pojačalo



Minimalni napon U_{XY} nije određen pomoćnim pojačalom:

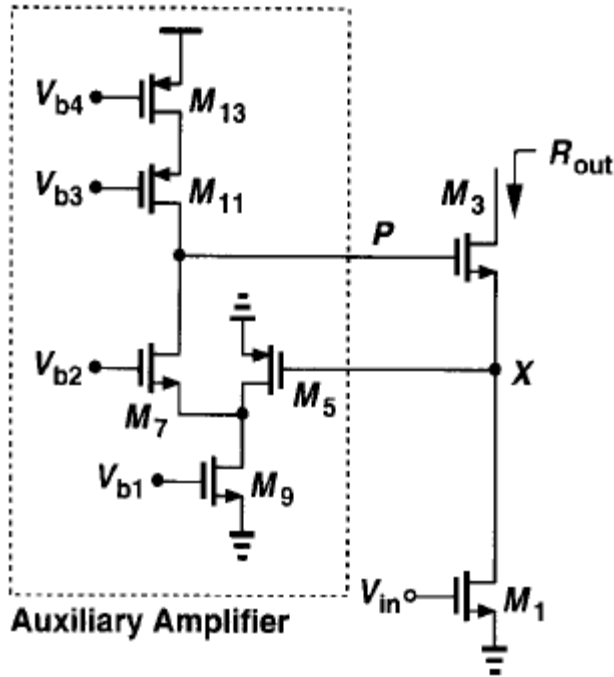
$$U_{X,Y} > U_{ODIP} - |U_{GS05}|$$

Nego osnovnim pojačalom:

$$U_{X,Y} > U_{OD1,2} + U_{ODISS}$$

Preklopljena kaskoda kao pomoćno pojačalo - primjer

Izračunati izlazni otpor za pojačalo na slici.



Pojačanje od X do P:

$$g_{m5}R_{iz1P}$$

Gdje je:

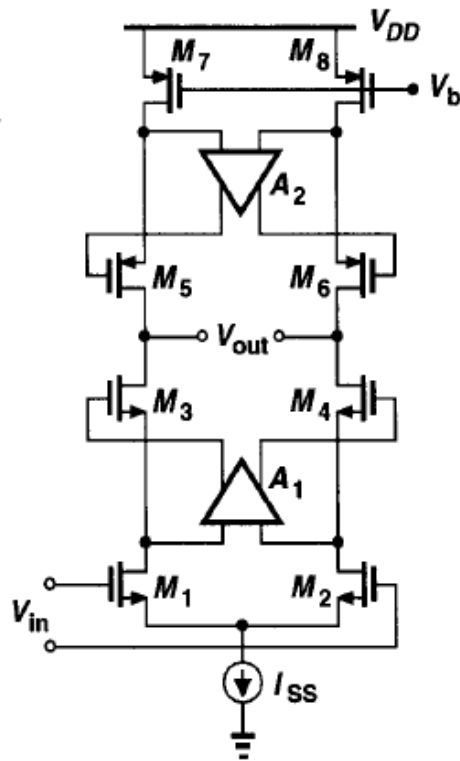
$$R_{iz1P} \approx [g_{m7}r_{O7}(r_{O9} \parallel r_{O5})] \parallel (g_{m11}r_{O11})r_{O13}$$

Ukupno izlazni otpor je:

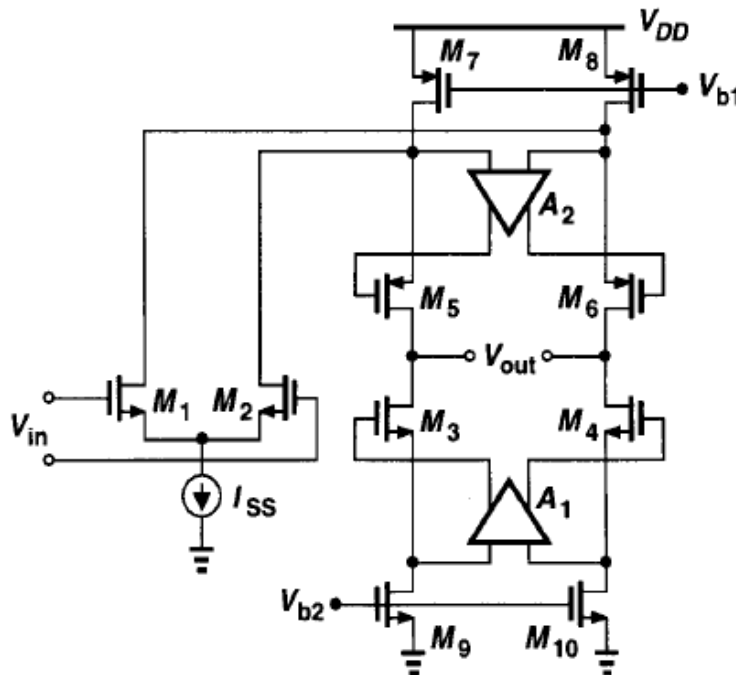
$$R_{iz} \approx g_{m3}r_{O3}r_{O1}(g_{m5}R_{iz1P})$$

Pojačanje kao kod četverostruke kaskode

Preklopljena kaskoda kao pomoćno pojačalo - primjer



(a)



(b)

Tehnika povećanja pojačanja može se primjeniti i na opteretne strujne izvore

Pomoćna pojačala unose polove i usporavaju pojačalo (manja širina frekvencijskog pojasa). Karakteristike ipak bolje nego kod dvostupanjskih pojačala.

Usporedba izvedbi OP

	Gain	Output Swing	Speed	Power Dissipation	Noise
Telescopic	Medium	Medium	Highest	Low	Low
Folded-Cascode	Medium	Medium	High	Medium	Medium
Two-Stage	High	Highest	Low	Medium	Low
Gain-Boosted	High	Medium	Medium	High	Medium

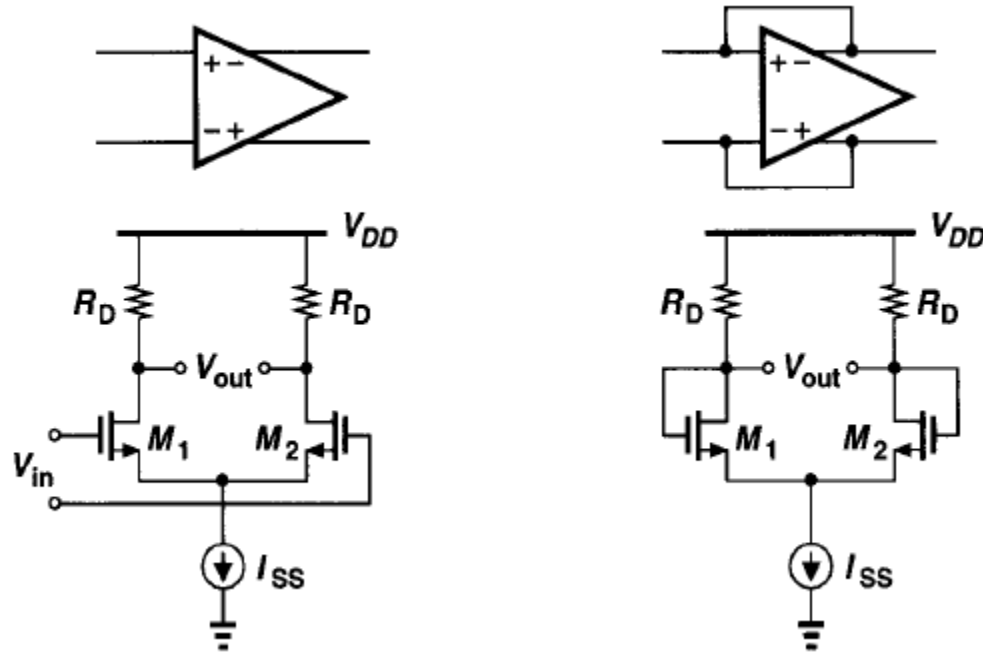
Povratna veza za zajednički signal

Potpuno diferencijaska pojačala:

- Veći hod napona
- Veća brzina (nema zrcalnih polova)
- Bolja linearnost (nema 2.harmonika)

Mora se koristiti povratna veza za zajednički signal.

Potpuno diferencijsko pojačalo – dobro definiran U_{CM}

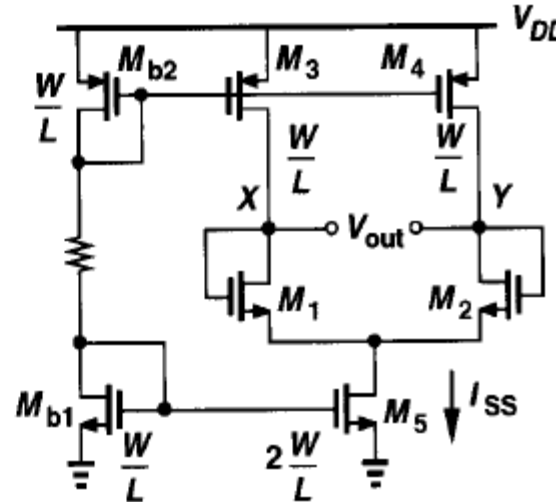
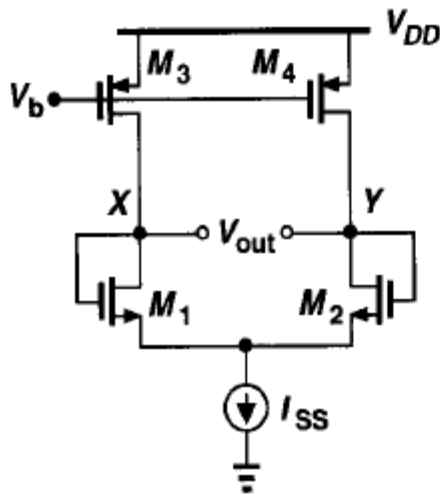


U nekim aplikacijama spajamo ulaze i izlaze (spoj sljedila) – diferencijska negativna povratna veza

Ulazni i izlazni zajednički signal dobro su definirani:

$$U_{CM} = V_{DD} - I_D R_D$$

Potpuno diferencijsko pojačalo – loše definiran U_{CM}



Ako zamijenimo otpornike strujnim izvorima kako bi povećali pojačanje. Što je s naponima U_X i U_Y ?

M1 i M2 vode struju $I_{SS}/2$

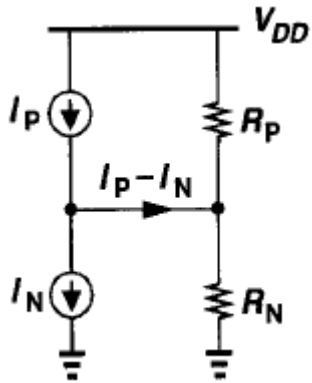
U_{CM} ovisi o tome koliko su struje I_{D3} i I_{D4} blizu $I_{SS}/2$

To ovisi o tome koliko strujno zrcalo dobro definira struje I_{SS} i $I_{D3,4}$

Npr. Ako je $I_{SS}/2$ manje od struje zasićenja $I_{D3,4}$ onda M3 i M4 ulaze u triodno područje kako bi $I_{D3,4}$ palo na $I_{SS}/2 \rightarrow V_X$ i V_Y raste

Ako je $I_{SS}/2$ veće od struje zasićenja $I_{D3,4}$ onda M5 ide u triodno i daje struju $I_{D3,4} \rightarrow V_X$ i V_Y padaju

Izlaz diferencijskog pojačala s velikim pojačanjem



U pojačalima želimo da struje PMOS (I_P) i NMOS (I_N) tranzistora budu izbalansirane odnosno jednake.

Razlika struja mora protjecati kroz izlazni otpor pojačala stvarajući pad napona:

$$(I_P - I_N) \cdot R_P \parallel R_N$$

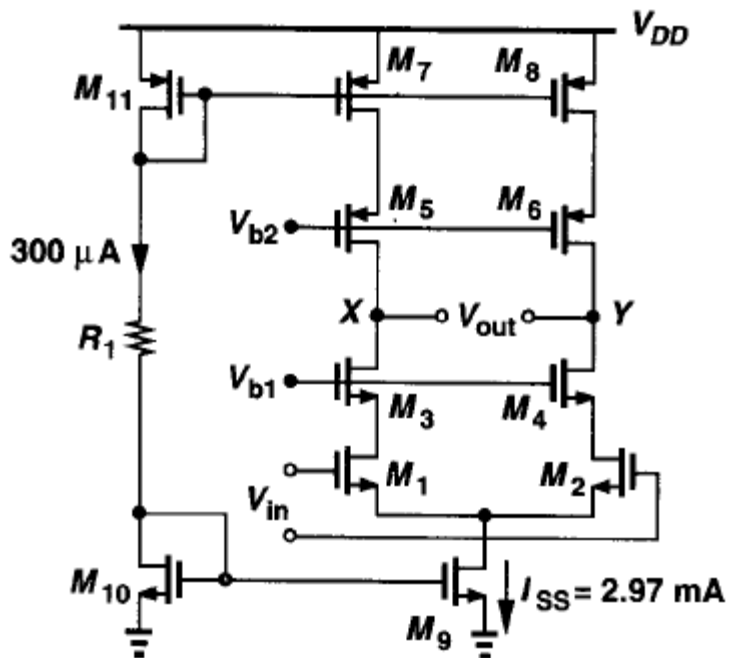
Pogreška u strujama ovisi o usklađenosti karakteristika tranzistora, a izlazni otpor je jako velik (njime postizemo veliko pojačanje) → velika pogreška napona koja postavi NMOS ili PMOS u triodno područje

Općenito pravilo (“od palca”):

Ako se U_{CM} ne može odrediti promatranjem sklopa bez da se izvode jednadžbe upotrebom modela tranzistora onda U_{CM} nije dobro definiran

Diferencijalna negativna povratna veza **NE MOŽE** definirati U_{CM}

Povratna veza za zajednički signal



Primjer:

Uzmimo teleskopsko pojačalo koje smo projektirali u prethodnim primjerima. Pretpostavimo da strujno zrcalo ima pogrešku od 1% za struju M9 u odnosu na M10 te da generira struju $I_{SS}=2.7\text{ mA}$ umjesto 3 mA . Uz pretpostavku savršene usklađenosti karakteristika za ostale tranzistore objasniti ponašanje sklopa.

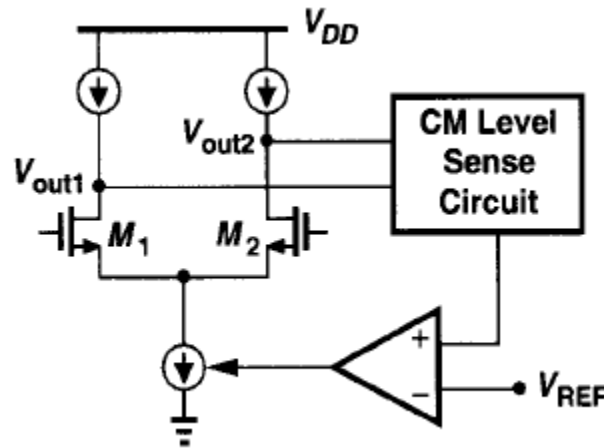
Iz prethodnog primjera izlazni otpor za asimetričan izlaz jednak je: $R_{iz} = 266\text{ k}\Omega$

Razlike u strujama I_{D5} i I_{D3} (te I_{D6} i I_{D4}): $\frac{30}{2}\text{ }\mu\text{A} = 15\text{ }\mu\text{A}$

Pogreška u izlaznom naponu je : $266\text{ k}\Omega \times 15\text{ }\mu\text{A} = 3.99\text{ V}$

Ta pogreška se ne može postići i VX i VY porastu tako da postave M5-M6 i M7-M8 u triodno i da im struje padnu na $I_{D7,8}=1.485\text{ mA}$

Povratna veza za zajednički signal - koncept



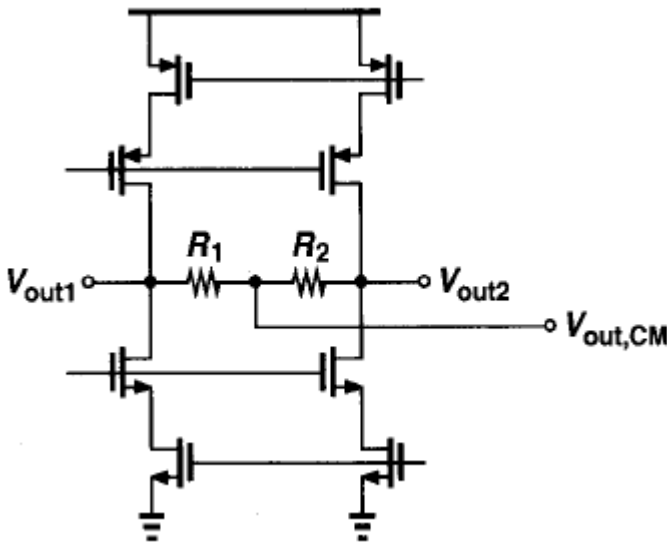
Povratna veza sastoji se od 3 radnje:

- Izmjeriti izlazni U_{CM}

- Usporediti sa referencom

- Pogrešku iskoristiti za podešavanje napajanja pojačala

Povratna veza za zajednički signal – mjerenje U_{izCM}



Definicija zajedničkog signala:

$$U_{izCM} = (U_{iz1} + U_{iz2})/2$$

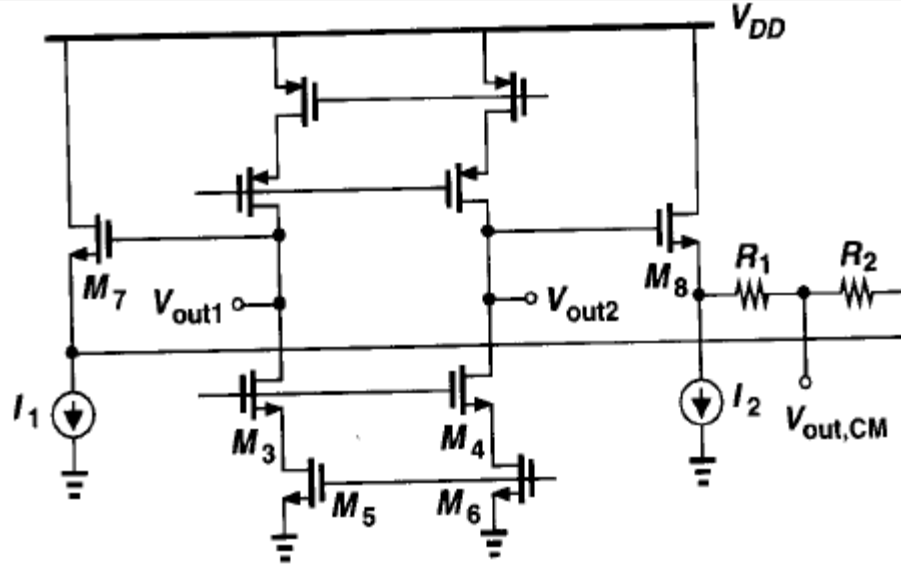
Korištenjem otpornog djelila:

$$U_{izCM} = (R_2 U_{iz1} + R_1 U_{iz2}) / (R_1 + R_2)$$

Što uz $R_1 = R_2$ daje: $U_{izCM} = (U_{iz1} + U_{iz2})/2$

U tom slučaju R_1 i R_2 moraju biti puno veći od R_{iz} pojačala kako ne bi rušili pojačanje
→ velika površina, parazitni kapacitet

Povratna veza za zajednički signal – mjerenje U_{izCM}



Kako bi se eliminirao utjecaj R_1 i R_2 na pojačanje, mogu se ubaciti sljedila.

U_{izCM} je pomaknut za $U_{GS7,8}$ ali to se može uzeti u obzir kod usporedbe

Glavni nedostatak je da je izlazni hod napona limitiran dodanom mrežom.

Bez mreže: $U_{izmin} = U_{OD3,4} + U_{OD5,6}$

S mrežom: $U_{izmin} = U_{OD1,2} + U_{GS7,8} = U_{OD1,2} + U_{OD7,8} + U_{GS7,8}$

Povratna veza za zajednički signal – mjerenje U_{izCM}

Moguće je koristiti tranzistore koji rade duboko u triodnom području.

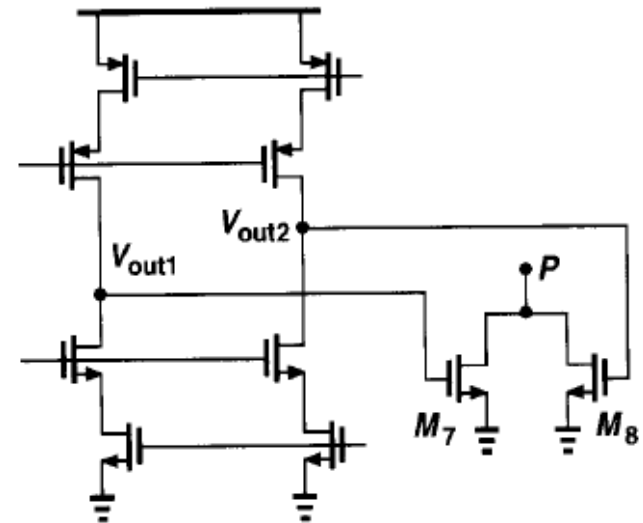
Otpor između točke P i mase je:

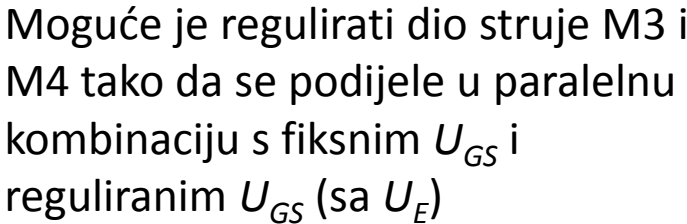
$$R_{tot} = R_{on7} \parallel R_{on8} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{iz1} - U_{GS0})} \parallel \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{iz2} - U_{GS0})} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{iz1} + U_{iz2} - 2U_{GS0})}$$

R_{tot} ovisi o $U_{iz1} + U_{iz2}$, a ne $U_{iz1} - U_{iz2}$

Ako izlazi rastu zajedno R_{tot} opada, a ako se mijenjaju diferencijalno jedan otpor raste, a drugi pada

Hod je limitiran ulaskom tranzistora (M7 ili M8) u područje zasićenja

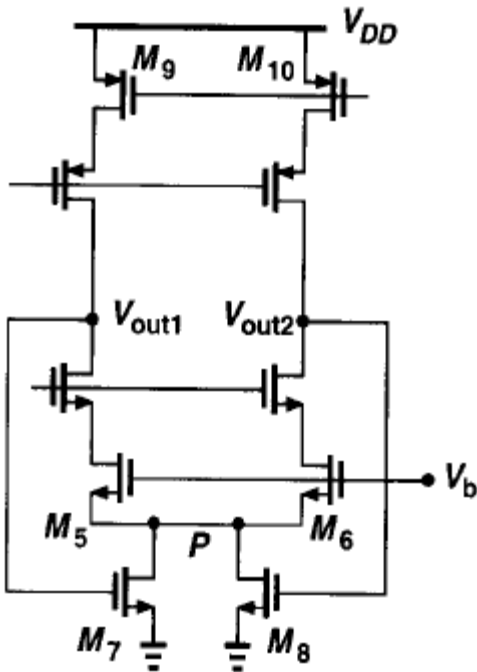




Ako U_{iz1} i U_{iz2} porastu, raste U_{izCM} . Napon pogreške (U_E) također raste (u fazi je s U_{izCM}) te rastu struje $I_{D3,4}$ što uzrokuje opadanje U_{izCM}

Moguće je primjeniti pogrešku na PMOS strujne izvore

Korištenje tranzistora u triodnom području



U_{izCM} se pretvara u otpor i nema usporedbe s referencom

$R_{on7} \parallel R_{on8}$ podešava struje M5 i M6

U_{izCM} podešava $R_{on7} \parallel R_{on8}$ tako da se $I_{D5,6}$ izjednače s $I_{D9,10}$

Ako je $I_{D9,10} = I_D$

Onda

$$U_b - U_{GS5} = 2I_D (R_{on7} \parallel R_{on8})$$

Odnosno korištenjem prije izvedenog izraza:

$$R_{on7} \parallel R_{on8} = \frac{U_b - U_{GS5}}{2I_D} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (U_{iz1} + U_{iz2} - 2U_{GS0})}$$

Korištenje tranzistora u triodnom području

$$U_{iz1} + U_{iz2} = \frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} \cdot \frac{1}{U_b - U_{GS5}} + 2U_{GS0}$$

U_{izCM} se može izračunati uzimajući u obzir da je:

$$U_{GS5} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_5}} + U_{GS05}$$

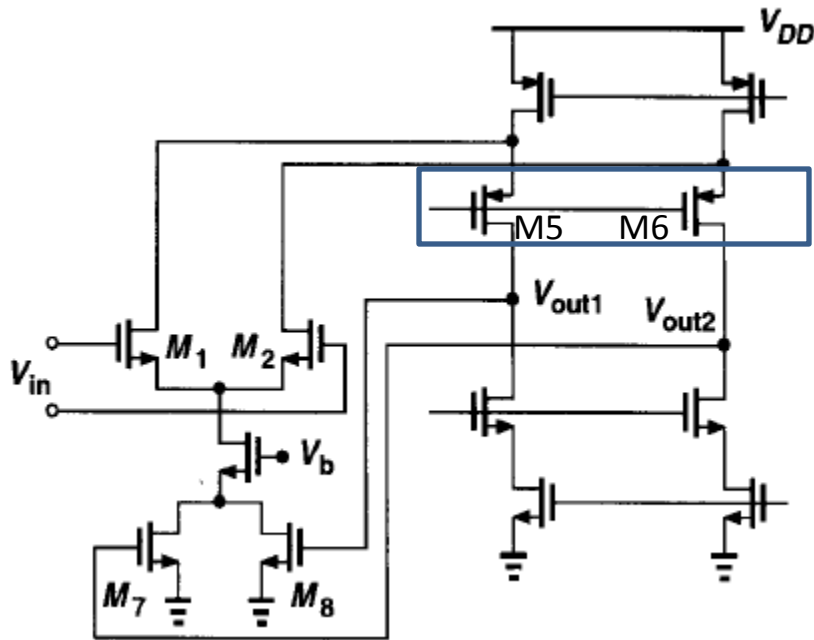
Nedostatci:

- U_{izCM} ovisi o parametrima tranzistora

- Pad napona na $R_{on7} \parallel R_{on8}$ limitira hod izlaznog napona

- Kako bi se smanjio pad napona na $R_{on7} \parallel R_{on8}$ M7 i M8 moraju biti široki → veliki kapacitet

Korištenje tranzistora u triodnom području



Izvedba koja rješava problem hoda

Ostaju problemi:

U_{izCM} ovisi o parametrima tranzistora

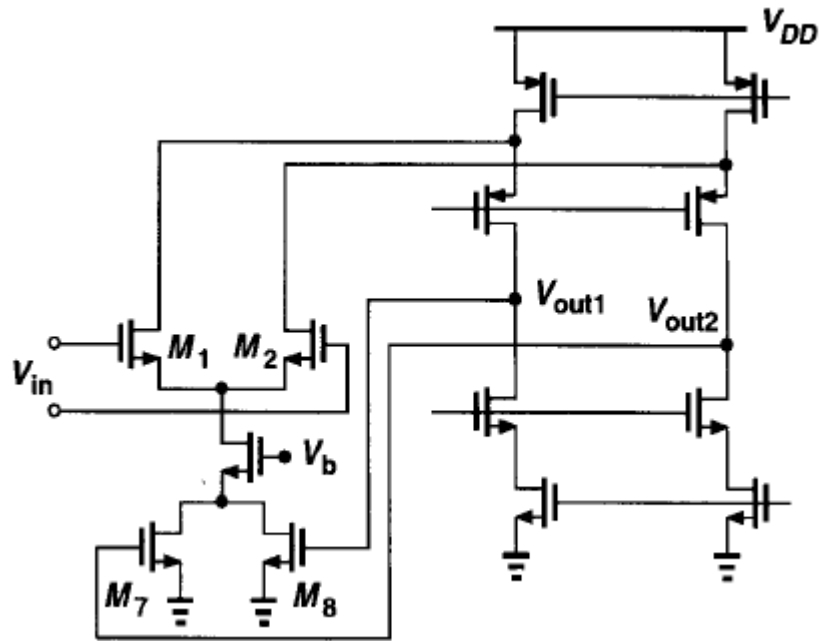
Kako bi se smanjio pad napona na $R_{on7} || R_{on8}$ M7 i M8 moraju biti široki → veliki kapacitet

U_{izCM} u određenoj mjeri ovisi o U_b

Ako je U_b previsok, struje $I_{D1,2}$ su veće, a struje $I_{D5,6}$ su manje pa M5-M6 idu u zasićenje, a izlazni napon opada – povratna veza popravlja tu grešku

Preciznost ovisi o pojačanju u petlji povratne veze za zajednički signal

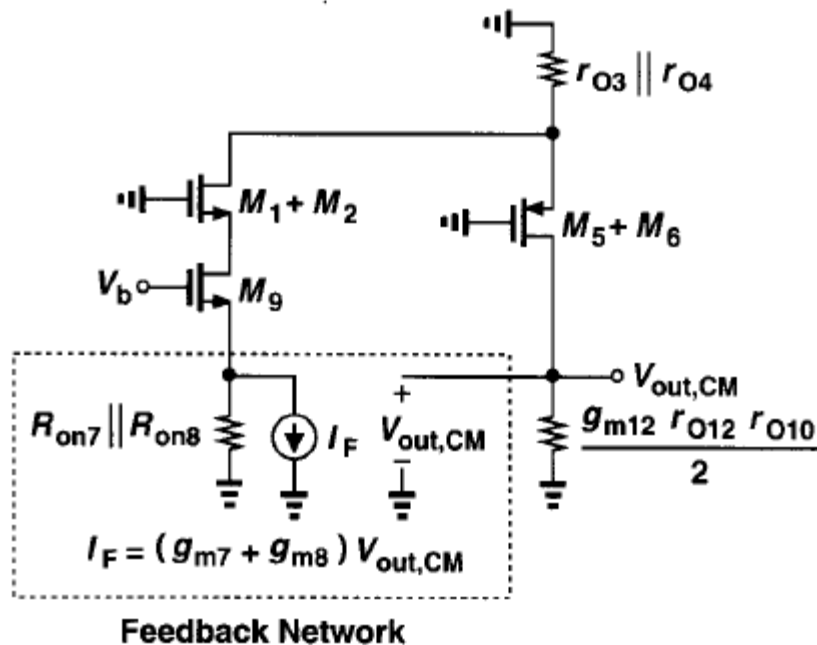
Korištenje tranzistora u triodnom području



Primjer:

Za sklop sa slike odrediti osjetljivost U_{izCM} o naponu U_b

Korištenje tranzistora u triodnom području



Kratko spajamo U_{ul} i crtamo nadomjesnu shemu

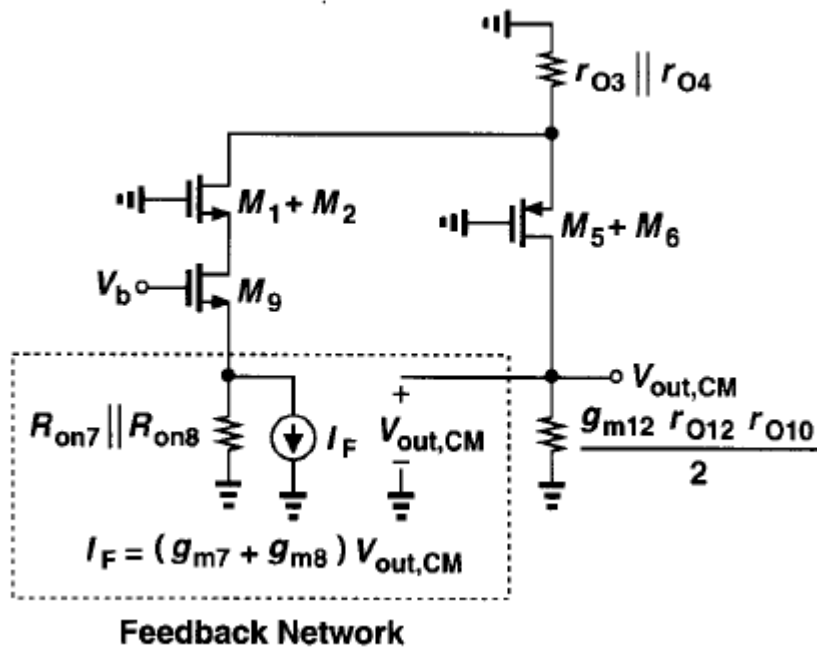
M7 i M8 su u triodnom području

$$g_{m7} = g_{m8} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} U_{DS7,8}$$

U dobro dizajniranom pojačalu, pojačanje je veliko pa je pojačanje u zatvorenoj petlji $1/\beta$ (β je faktor povratne veze)

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{V_2}{V_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{-I_F(R_{on7} \| R_{on8})}{U_{izCM}} = \frac{-(g_{m7} + g_{m8}) \cdot U_{izCM} \cdot (R_{on7} \| R_{on8})}{U_{izCM}} = \\ &= -2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_{7,8} U_{DS7,8} \frac{1}{2\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_{7,8} (U_{GS7,8} - U_{GS07,8})} = -\frac{U_{DS7,8}}{U_{GS7,8} - U_{GS07,8}}\end{aligned}$$

Korištenje tranzistora u triodnom području

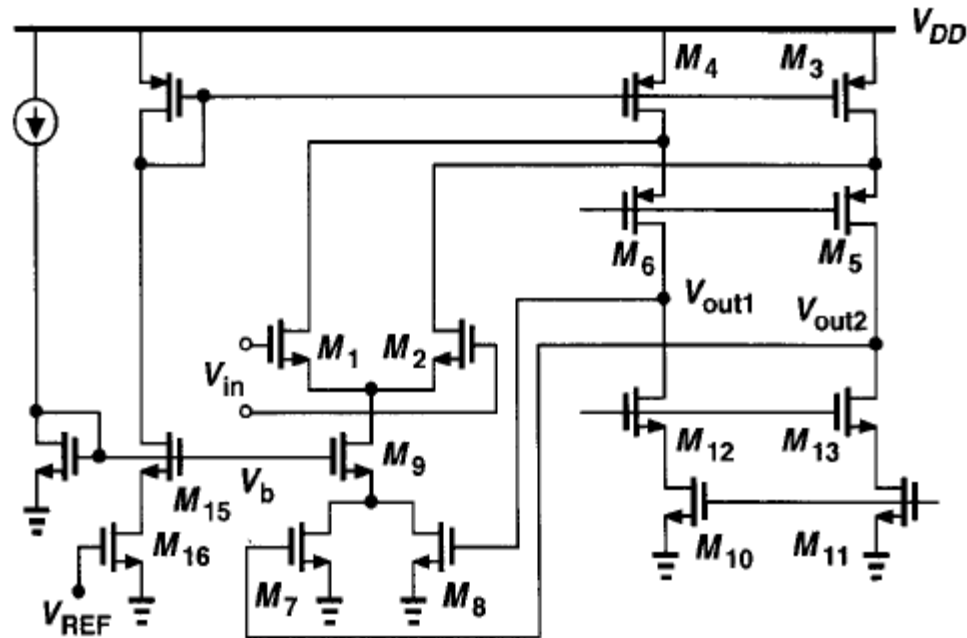


$$\left| \frac{dU_{izCM}}{dU_b} \right| = \frac{1}{\beta} = \frac{U_{GS7,8} - U_{GS07,8}}{U_{DS7,8}}$$

$U_{GS7,8}$ je tipično oko $U_{DD}/2$

Prema tome potrebno je maksimizirati $U_{DS7,8}$

Korištenje tranzistora u triodnom području

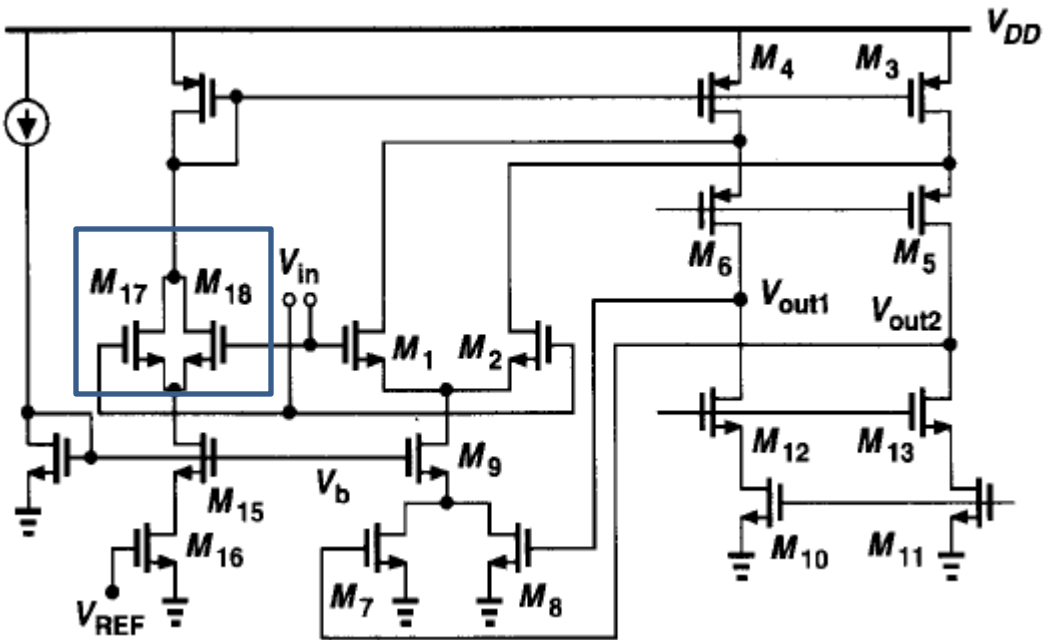


Izvedba neovisna o parametrima tranzistora i U_b

Dimenzije $(W/L)_{15} = (W/L)_9$ i $(W/L)_{16} = (W/L)_7 + (W/L)_8$

$I_{D9} = I_{15}$ samo ako je $U_{izCM} = U_{REF}$

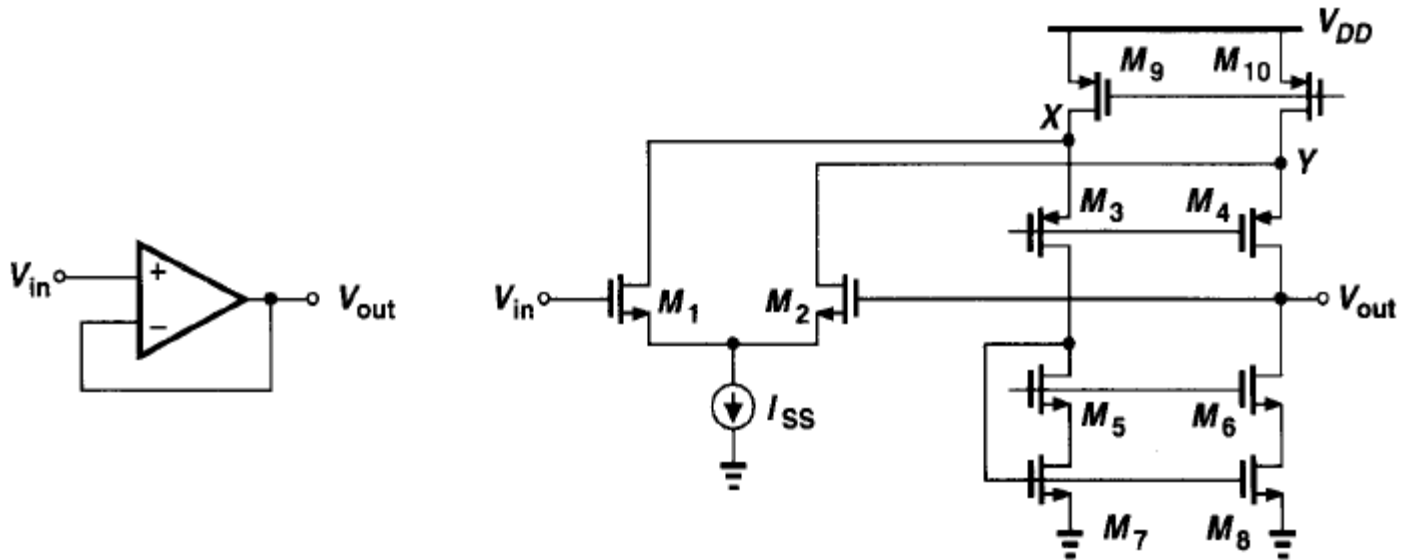
Postignuto je $U_{izCM} = U_{REF}$ bez korištenja otpornika



U prethodnoj izvedbi $U_{DS9} \neq U_{DS15}$

Dodavanjam M17 i M18 postiže se $U_{DS9} = U_{DS15}$

Ograničenje hoda ulaznog napona



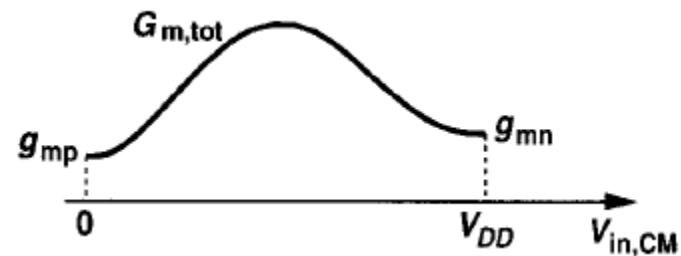
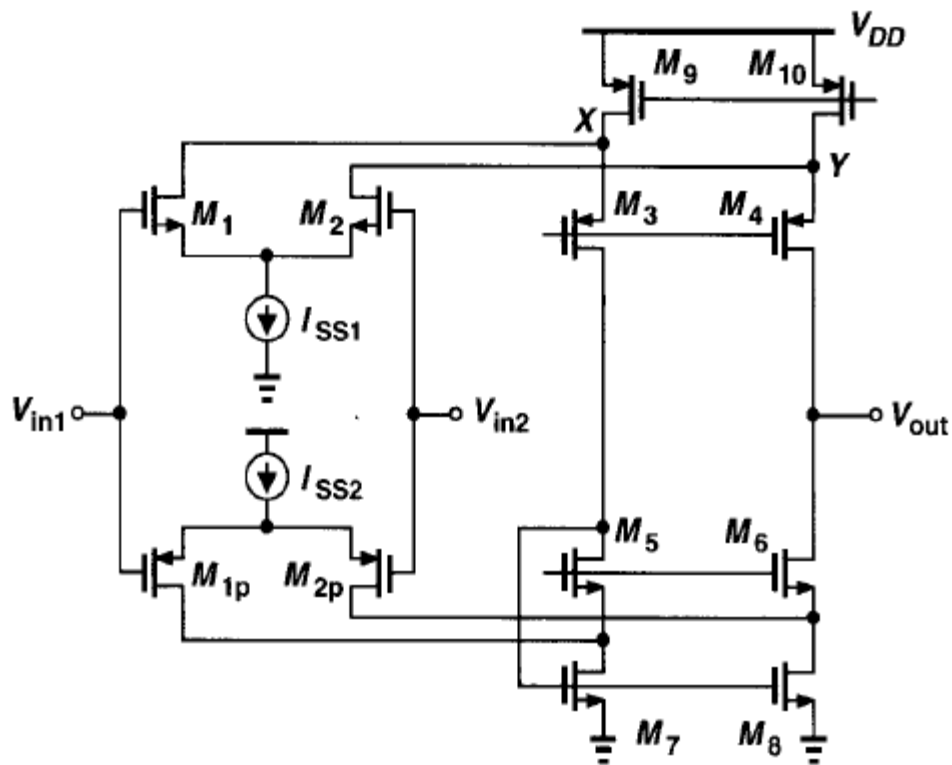
Npr. kod spajanja u sljedilo

$$\text{hod}(U_{iz}) = U_{ODSS} + U_{GS2} = U_{ODSS} + U_{GS01} + U_{OD1}$$

Hod napona određen je ulaskom tranzistora kojim je realiziran I_{SS} u triodno područje za niske napone

To je hod napona za jedan napon praga manji nego što određuje hod izlaza

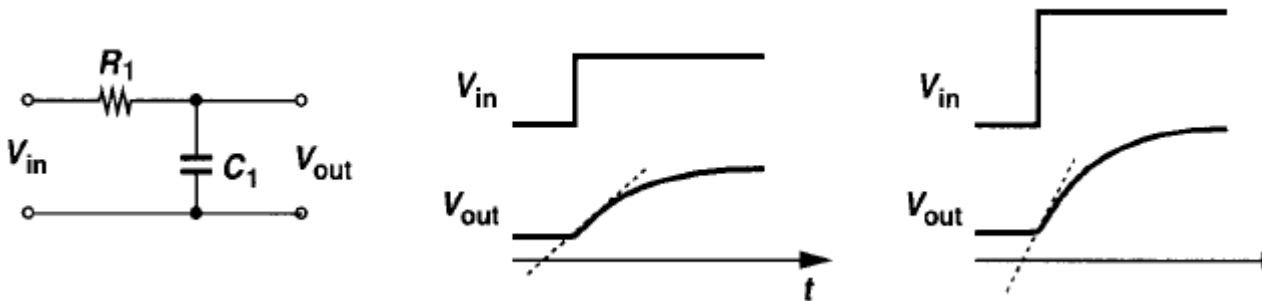
Ograničenje hoda ulaznog napona



Moguće rješenje je paralelno spajanje ulaznih diferencijskih parova izvedenih s NMOS i PMOS tranzistorima

U tom slučaju strmina ovisi o ulaznom zajedničkom signalu – utječe na pojačanje, brzinu, šum

Brzina porasta izlaznog napona – linearni odziv



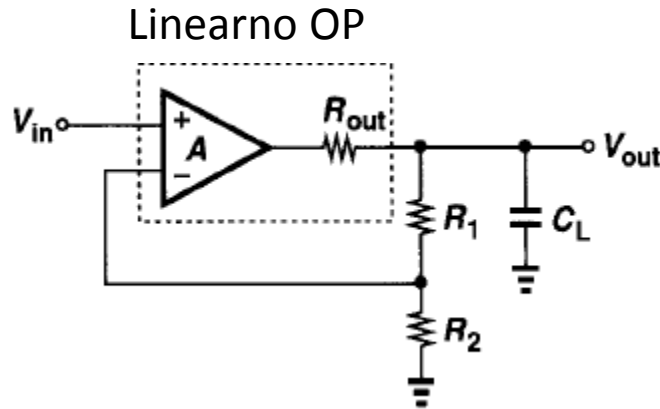
Primjer jednostavnog linearnog sustava – RC mreža

Odziv na skokovitu pobudu:
$$u_{iz}(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Ako pobudu udvostručimo, odziv (izlaz) je u svakoj točki dvostruko veći \rightarrow dvostruko veći porast izlaznog napona

Svojstvo linearnih sustava je da je brzina porasta odziva na skokovitu pobudu proporcionalna konačnoj vrijednosti

Brzina porasta izlaznog napona – linearni odziv



Vrijedi i za linearni odziv linearnih sustava s povratnom vezom, npr. za pojačalo sa slike:

$$\left[\left(U_{ul} - U_{iz} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot A - U_{iz} \right] \frac{1}{R_{iz}} = \frac{U_{iz}}{R_1 + R_2} + U_{iz} C_L s$$

Uz $R_1 + R_2 \gg R_{iz}$

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}}(s) \approx U_0 \frac{A}{\left(1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left[1 + \frac{C_L R_{iz}}{1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2}} s \right]}$$

Brzina porasta izlaznog napona – linearni odziv

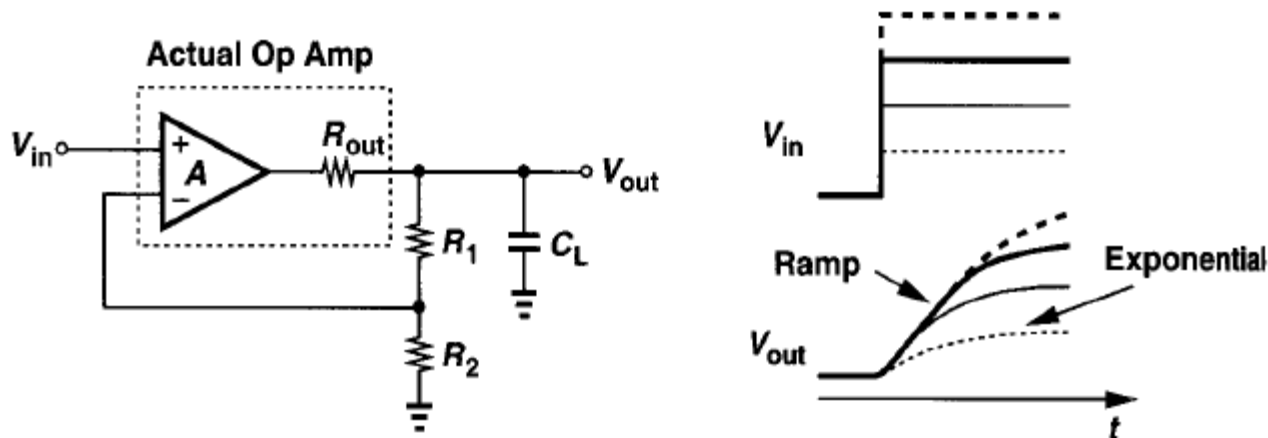
Odziv na skokovitu pobudu je:

$$U_{iz} \approx U_0 \frac{A}{1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \left[1 - \exp \left(\frac{-t}{\frac{C_L R_{iz}}{1 + A \frac{R_2}{R_1 + R_2}}} \right) \right]$$

Brzina porasta izlaznog napona proporcionalna je konačnoj vrijednosti

Tzv. “linearno smirivanje” (eng. “linear settling”)

Brzina porasta izlaznog napona – odziv realnog OP



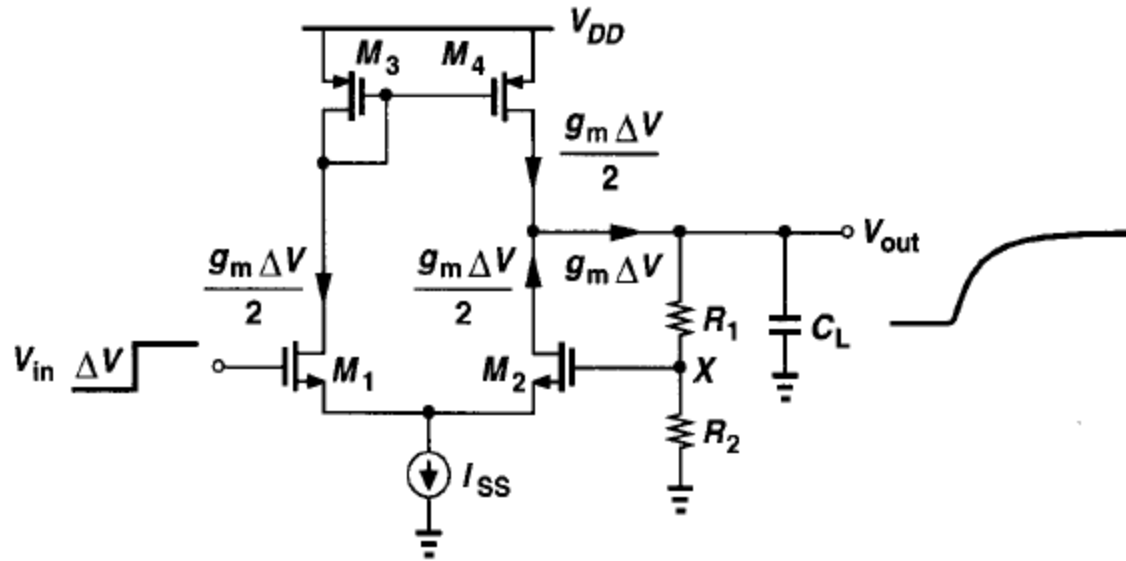
Odziv pojačala realiziranog s realnim operacijskim pojačalom:

Za skokovite pobude male amplitude odziv je rastuća eksponencijala (linearno smirivanje)

Za skokovite pobude velike amplitude odziv je ograničen linearnim porastom izlaznog napona koji ima konstantan nagib

Odziv je ograničen brzinom porasta izlaznog napona (eng. Slew rate)

Realno OP – odziv na skokovitu pobudu male amplitude



Ako promatramo jednostavno pojačalo (u sklopu s prethodnog slajda) i pretpostavimo da je $R_1 + R_2$ veliko (ne opterećuje izlaz)

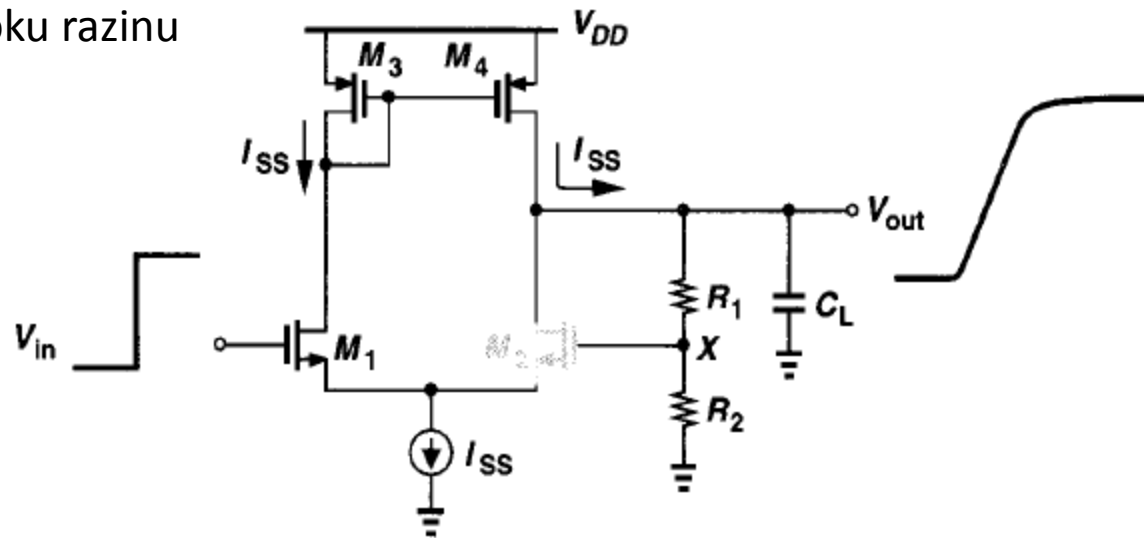
M1 i M2 pretvaraju ulazni diferencijski signal u protufazne struje

Struja M1 se preko zrcala M3-M4 preslika u izlaznu granu te struja $g_m \Delta V$ nabija C_L

Raste U_{iz} , ali isto tako raste U_X te smanjuje razliku napona U_{G1} i U_{G2} što smanjuje izlaznu struju
→ odziv ima linearno smirivanje

Realno OP – odziv na skokovitu pobudu velike amplitude

Prelazak iz niske u visoku razinu



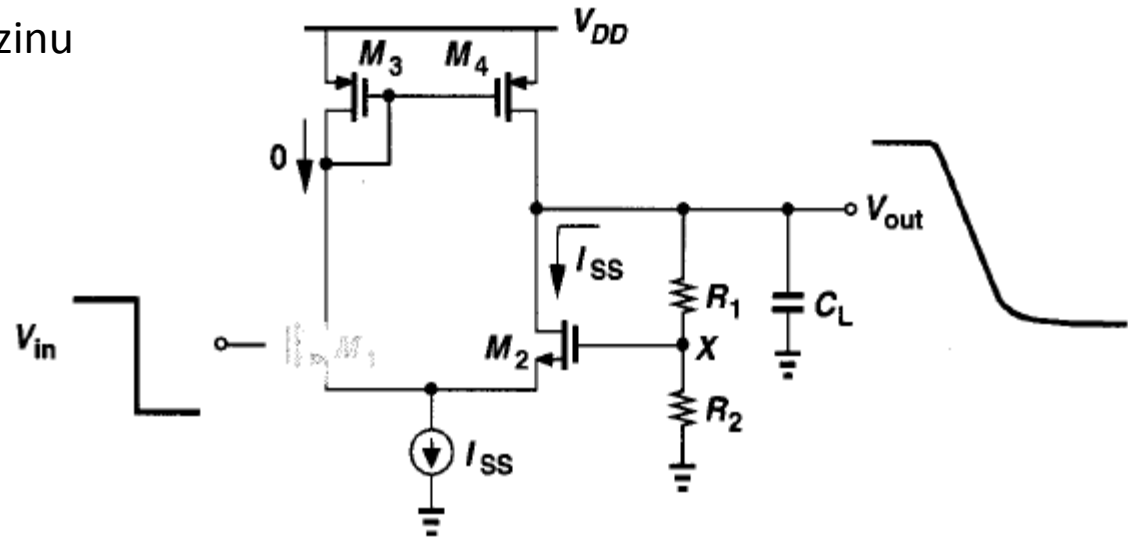
Veliki skok ulaznog napona isključi granu s M_2 , I_{SS} se zatvara kroz granu M_1 .

Preko zrcala M_3 - M_4 I_{SS} se zrcali i nabija C_L konstantnom strujom \rightarrow linearni porast U_{iz} (nelinearni režim rada)

Kako U_{iz} raste, raste i U_X te se M_2 uključuje \rightarrow sklop se vraća u linearni režim

Realno OP – odziv na skokovitu pobudu velike amplitude

Prelazak iz visoke u nisku razinu



Veliki skok ulaznog napona isključi granu s M_1 , I_{SS} se zatvara kroz granu M_2 .

C_L se izbiju konstantnom strujom $I_{SS} \rightarrow$ linearni pad U_{iz}
(nelinearni režim rada)

Kako U_{iz} pada, pada i U_X te se M_1 uključuje \rightarrow sklop se vraća u linearni režim

Nelinearni režim rada – ako poraste ulazni napon, izlazni se ne poveća jednako u svim točkama u vremenu zato jer je porast ograničen nagibom koji ne ovisi o ulaznom naponu nego struji napajanja i C_L

Realno OP – odziv na skokovitu pobudu velike amplitude

Nelinearni režim rada u kojem je brzina odziva ograničena brzinom porasta je nepoželjna pojava u sklopovima velike brzine rada koji rade s velikim amplitudama signala

Širina frekvencijskog pojasa za mali signal može sugerirati brz vremenski odziv, a da pri tome vremenski odziv za veliki signal bude ograničen brzinom porasta (struja koja nabija dominantni kapacitet je mala)

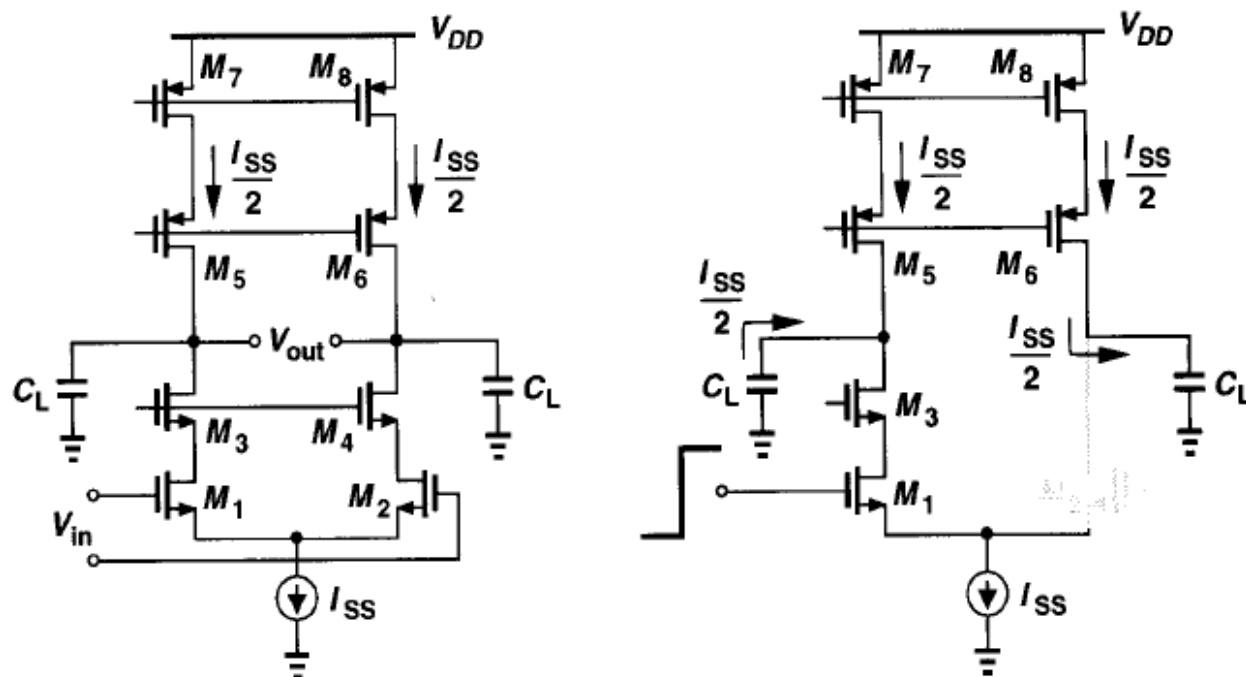
Pošto je odnos ulaza i izlaza nelinearan, izlaz ima nelinearna izobličenja

Ako sklop mora pojačati signal : $u_{ul}(t) = U_0 \sin \omega_0 t$

Onda brzina porasta mora biti veća od:

$$\left. \frac{d u_{ul}(t)}{d t} \right|_{t=0} = U_0 \omega_0 (\cos \omega_0 t) \Big|_{t=0} = U_0 \omega_0$$

Teleskopsko OP – odziv na skokovitu pobudu velike amplitude



Veliki skok ulaznog napona isključi M_2 , I_{SS} se zatvara kroz granu M_1 - M_3

Kaskodni strujni izvori izvedeni s PMOS tranzistorima M_5 - M_7 napajani su strujom $I_{SS}/2$

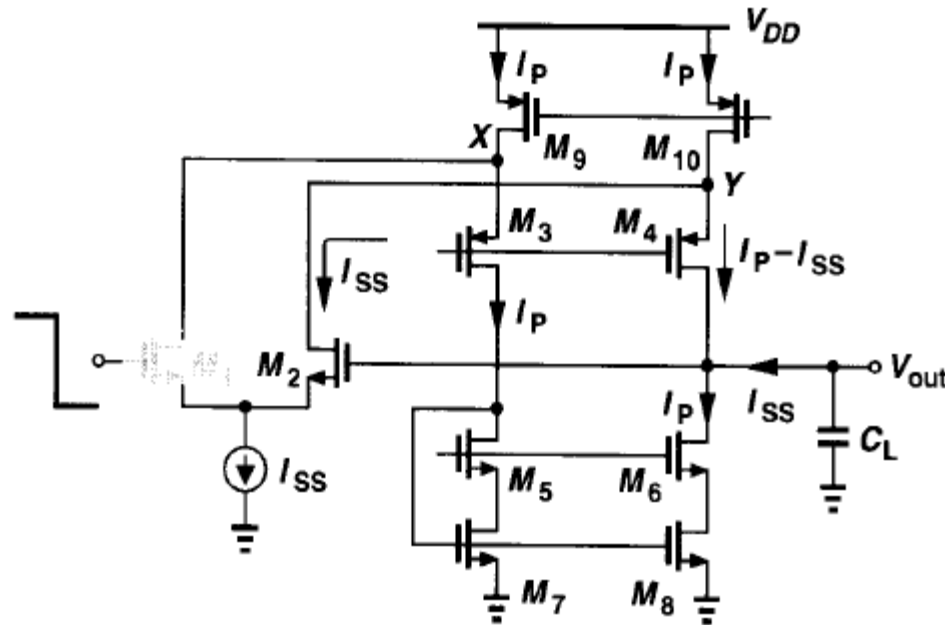
Opretni kapacitet C_L spojen na odvode M_3 i M_5 se izbija strujom $I_{SS}/2$, a C_L spojen na odvode M_4 i M_6 nabija se strujom $I_{SS}/2$

Brzina porasta za asimetrični izlaz $I_{SS}/2C_L$, simetrični izlaz I_{SS}/C_L



Brzina porasta I_{SS}/C_L

Preklopljena kaskoda– odziv na skokovitu pobudu velike amplitude



Vrijedi za $I_P > I_{SS}$

Negativni skok ulaznog napona isključi M1, I_{SS} se zatvara kroz granu M2
PMOS strujni izvor osigurava struju I_P

M4, M6 i M8 dobivaju struju $I_P - I_{SS}$ koja se zrcali kaskodnim strujnim zrcalom M5~M8

Opteretni kapacitet C_L izbija se strujom I_{SS}

Brzina porasta (pada) I_{SS}/C_L