
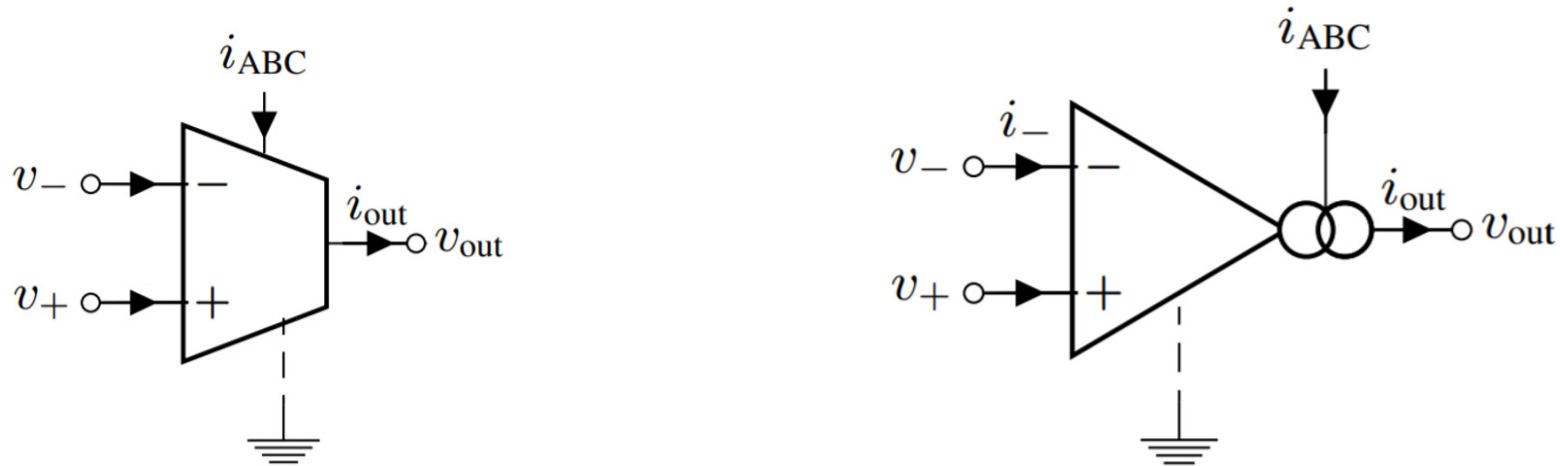


Operacioni transkonduktanski pojačavač  
(Operational Transconductance Amplifier – OTA)



## Operacioni transkonduktanski pojačavač

- **Operacioni transkonduktanski pojačavač (Operational Transconductance Amplifier – OTA)** predstavlja direktno spregnuti strujni izvor kontrolisan diferencijalnim naponom.
- Transkonduktanski operacioni pojačavač ima kao i standardni operacioni pojačavač ima simetričan ulaz na koji se dovodi diferencijalni napon i asimetričan izlaz (između izlaznog čvora i mase). Pored tih priključaka OTA sadrži i dodatni priključak za promenu struje polaricija  $i_{ABC}$ . Preko ovog ulaza menja se vrednost transkonduktanse.



# Operacioni transkonduktanski pojačavač

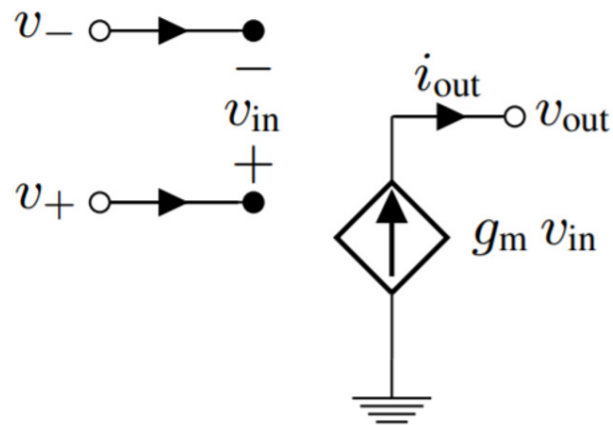
## Razlike između operacionog pojačavača i OTA

- Za razliku od operacionog pojačavača kod koga se ne može podešavati naponsko pojačanje OTA ima mogućnost podešavanja transkonduktanse. Transkonduktansa se podešava promenom struje polarizacije (kod bipolarnih OTA) ili napona polarizacije (kod MOSFET OTA). U analitičkom izrazu prenosne funkcije kola sa OTA pojavljuju se kao parametri i transkonduktanse operacionih pojačavača. Ova osobina pruža veću fleksibilnost prilikom projektovanja analognih kola.
- Izlazna otpornost OTA je veoma velika (kod idealnog beskonačna) jer se na izlazu ponaša kao strujni generator. Sa druge strane operacioni pojačavač ima veoma malu izlaznu otpornost jer se na izlaznom pristupu ponaša kao naponski generator.
- Svako linearno kolo koje sadrži standardni operacioni pojačavač mora da sadrži negativnu povratnu spregu. Prilikom realizacije linearnog kola koje sadrži OTA nije neophodno uvoditi negativnu povratnu spregu.

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Model idealnog OTA i osobine idealnog OTA

- Transkonduktansa  $g_m$  je konačna i kontrolisana strujom polarizacije  $I_{ABC}$
- Ulazna otpornost je beskonačna  $R_{ul} \rightarrow \infty$
- Izlazna otpornost je beskonačna  $R_{iz} \rightarrow \infty$
- Pojačavač je idealno balansiran:  $I_{out}=0$  kada je  $V^- = V^+$
- Propusni opseg je beskonačan  $\omega_0 \rightarrow \infty$

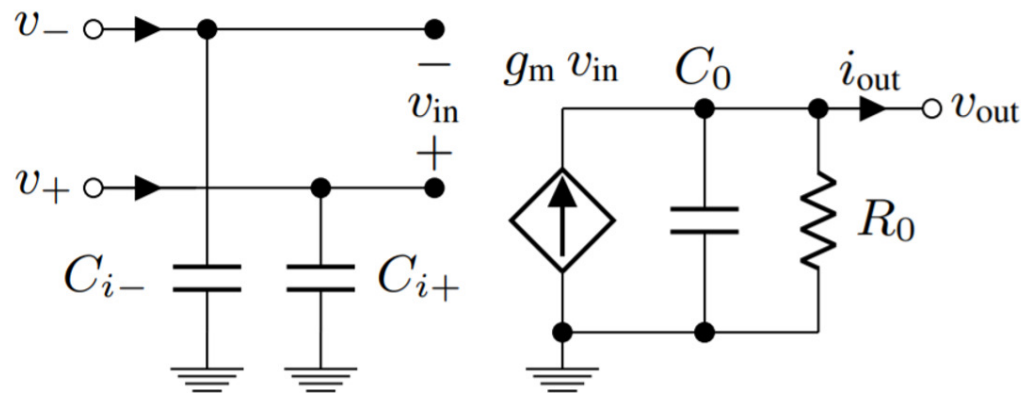


# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Karakteristike realnog OTA

- Ofset napon, ofset struje, struje polarizaciji (parametri jednosmerne struje koji se definišu kao kod standaradnog operacionog pojačavača).
- Konačna vrednost ulazne otpornosti  $R_{ul}$ .
- Nenulta vrednost izlazne otpornosti  $R_{iz}$ .
- Konačna vrednost faktora potiskivanja CMRR.
- Konačna širina propusnog opsega (kao kod standaradnog O.P. u frekvencijskoj karakteristici postoji jedan dominantan pol). U ovom slučaju prenosna funkcija je transkonduktansa a ne naponsko pojačanje.

$$g_m(s) = \frac{g_{m0} \cdot \omega_a}{s + \omega_a}$$



# Operacioni transkonduktanski pojačavač

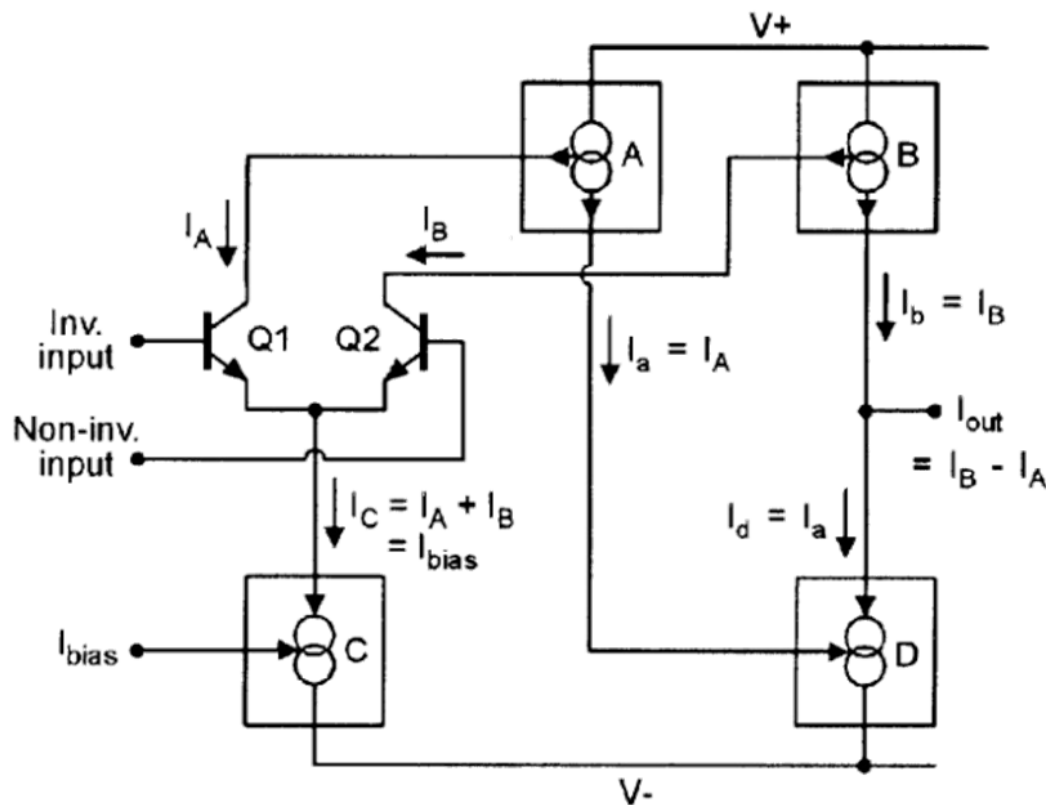
## ▪ Karakteristike realnog OTA

<i>Characteristics at T = 25 °C, Vcc = ± 15 v</i>	<i>Min</i>	<i>Typ.</i>	<i>Max.</i>	<i>Units</i>
Input offset voltage	–	0.25	0.5	mV
Input offset current	–	300	700	nA
Input bias current	–	1800	5000	nA
Peak output current	350	410	650	μA
Large signal forward Transconductance, $g_m$	–	0.8	1.2	m Mho
CMRR	94	100	–	DB
Common mode input Voltage range	–13	–	+13	V
Slew rate	–	125	–	V/μs
Input resistance	500	–	–	Kohm
Open loop bandwidth	–	9	–	MHz
Noise voltage, $e_N$ , at 1 KHz	–	8	–	NV/Hz

## Operacioni transkonduktanski pojačavač

- Bipolarni OTA
  - Pojedinačne komponente: LM3080, CA3080
  - Dvostruki OTA unutar istog čipa: LM13600, CA3280
  - Tri OTA unutar istog čipa: CA3060
  - OTA sa unapređenim performansama dobijenim dodatnim baferima i diodama za linearizaciju (koriste se za povećanje dinamičkog opsega): LM13600, LM13700, NE5517.

## Struktura OTA

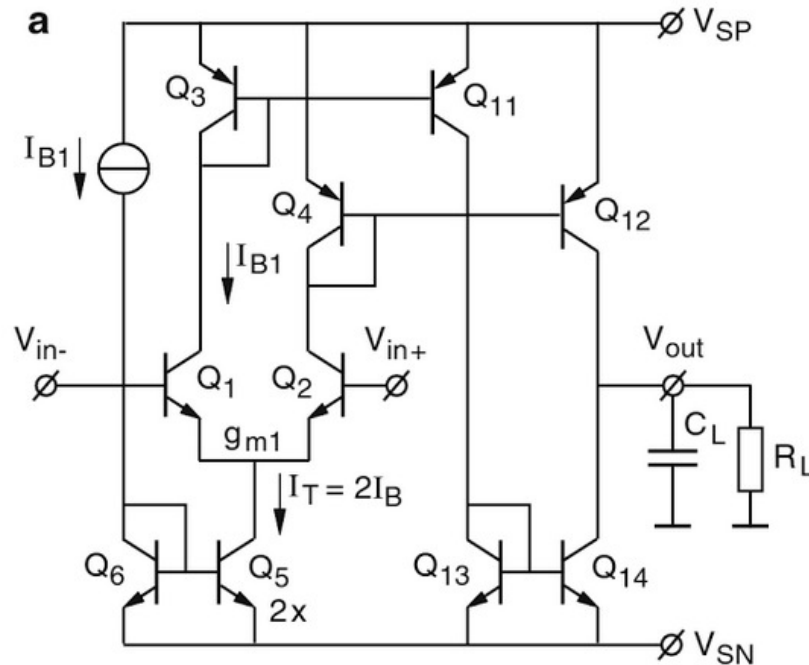


Slika prikazuje principijelnu šemu OTA. Pored diferencijalnog para koji čine tranzistori Q1 i Q2 kolo sadrži izvor konstantne struje C, kao i strujna ogledala A, B i D.

Ulazni stepen je diferencijalni pojačavač. Struja koju daje izvor konstantne struje C podešava se preko priključka za struju polarizacije,  $I_{bias}$ .



## Struktura OTA



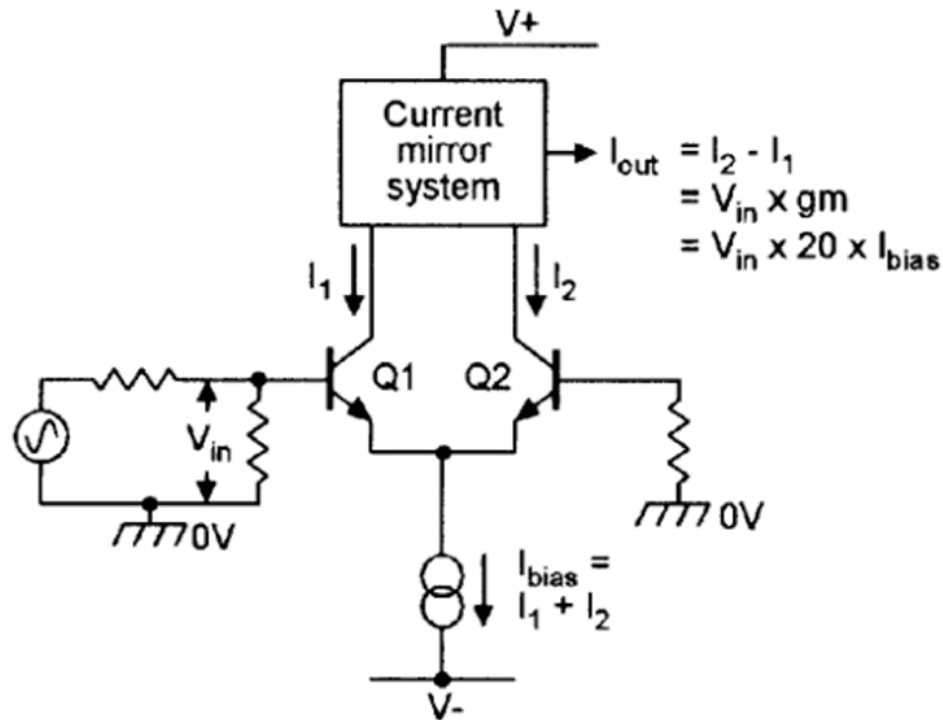
**Pojednostavljena šema  
OTA na nivou tranzistora.**

Na šemi se mogu uočiti strujna ogledala koje čine sledeći parovi tranzistora: Q3 i Q11, Q13 i Q14, Q4 i Q12. Strujno ogledalo A (Q3 i Q11) preslikava struju kolektora tranzistora Q1 u struju kolektora tranzistora Q11. Strujno ogledalo D (Q13 i Q14) preslikava struju kolektora Q11 u struju tranzistora Q14. Strujno ogledalo B (Q4 i Q12) preslikava struju kolektora Q2 u struju tranzistora Q12.

Uloga strujnih ogledala je da obezbede da izlazna struja bude jednaka razlici struja kolektora tranzistora u diferencijalnom paru Q1 i Q2.

$$i_{out} = i_{C2} - i_{C1}$$

# Proračun transkonduktanse



$$i_{C1} = I_S \cdot e^{v_{BE1}/V_T} \Rightarrow v_{BE1} = V_T \cdot \ln \frac{i_{C1}}{I_S}$$

$$i_{C2} = I_S \cdot e^{v_{BE2}/V_T} \Rightarrow v_{BE2} = V_T \cdot \ln \frac{i_{C2}}{I_S}$$

$$v_{in} = v_{BE1} - v_{BE2}$$

---


$$v_{in} = V_T \cdot \ln \frac{i_{C1}}{i_{C2}}$$

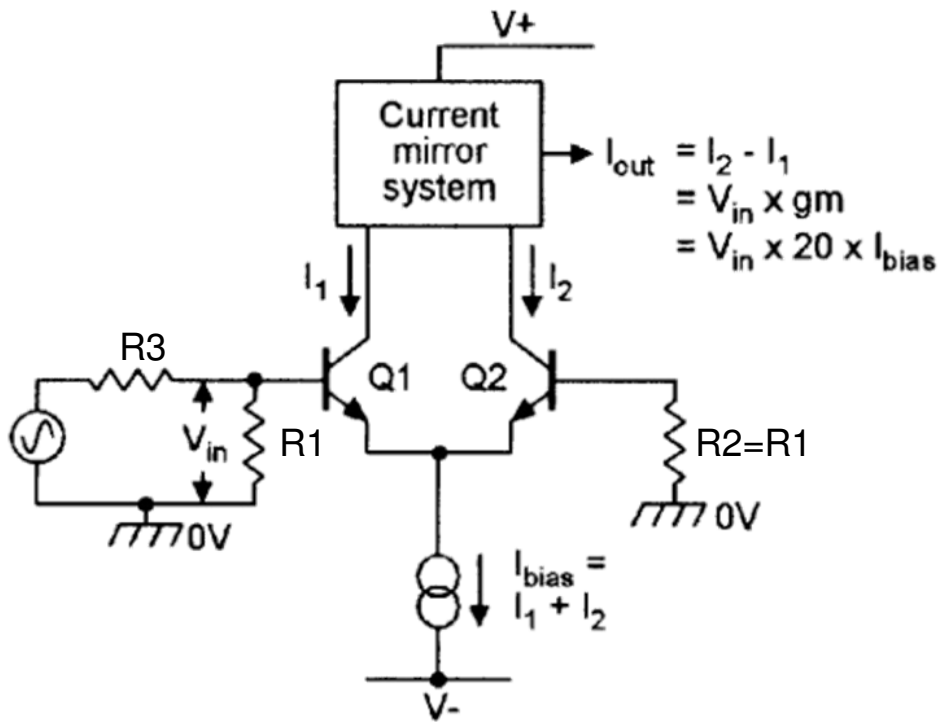
$$v_{in} = V_T \cdot \ln \left( 1 + \frac{i_{C1} - i_{C2}}{i_{C2}} \right)$$

Razvojem u Tajlorovo red dobija se linearna zavisnost za male vrednosti argumenata.

$$\ln(1+x) = x - \frac{1}{2} \cdot x^2 + \frac{1}{3} \cdot x^3 + \dots \quad \text{za} \quad x \ll 1 \quad \ln(1+x) \approx x$$

$$v_{in} = V_T \cdot \left( \frac{i_{C1} - i_{C2}}{i_{C2}} \right)$$

# Proračun transkonduktanse



$$v_{in} \approx V_T \cdot \left( \frac{i_{C1} - i_{C2}}{i_{C2}} \right)$$

$$i_{C2} \approx i_{C1} \approx \frac{I_{bias}}{2}$$

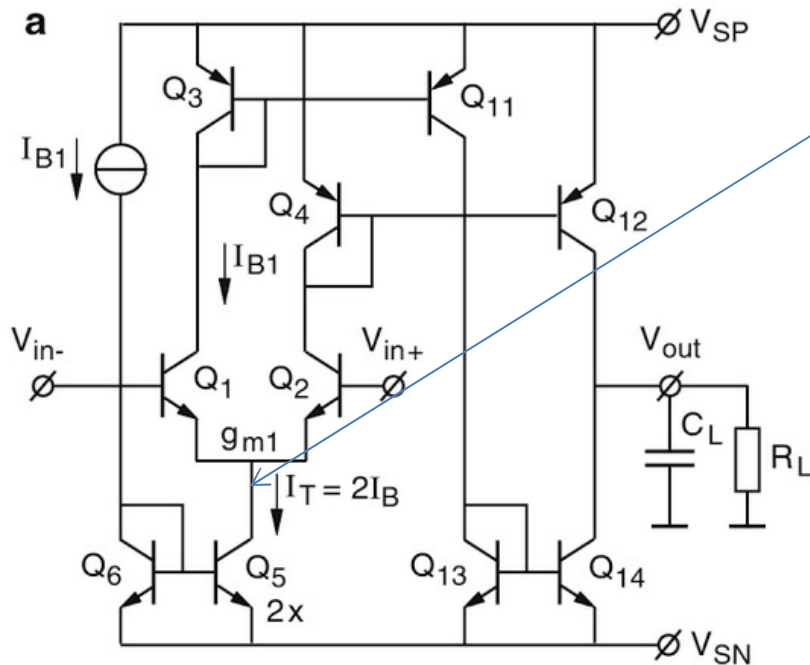
$$v_{in} \approx V_T \cdot \frac{i_{C1} - i_{C2}}{i_{C2}} \approx 2 \cdot V_T \cdot \frac{i_{C1} - i_{C2}}{I_{bias}}$$

$$i_{out} = i_{C2} - i_{C1} \approx \frac{I_{bias}}{2 \cdot V_T} \cdot v_{in}$$

$$g_m = \frac{I_{bias}}{2 \cdot V_T} \approx I_{bias} \cdot 20V^{-1}$$

- Usled nelinearnosti strujno naponske karakteristike bipolarnog tranzistora ulazni napon nebi trebao da predje vrednost od 25 mVp-p ukoliko se žele izbeći nelinearna izobličenja.

# Operacioni transkonduktanski pojačavač



Diferencijalni par: Q1, Q2

$$I_T = I_{E1} + I_{E2}$$

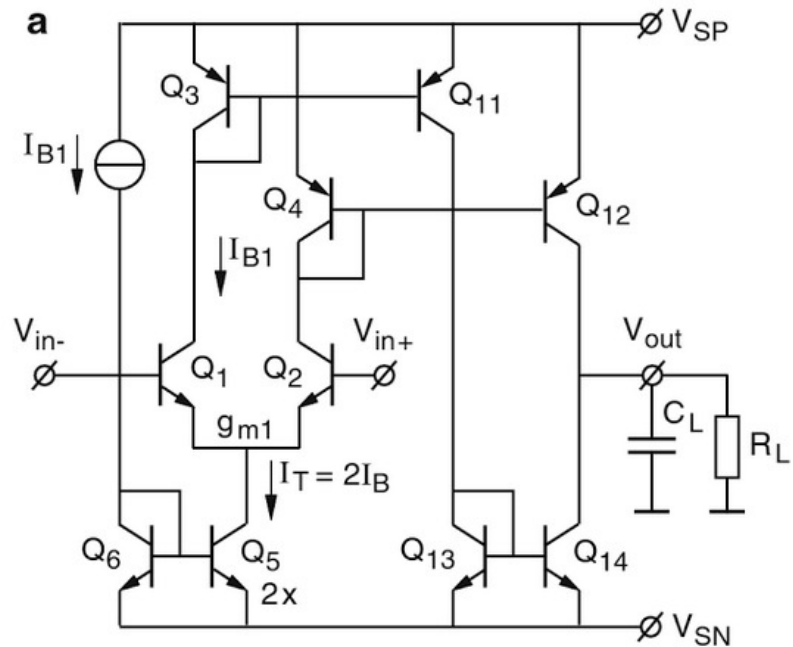
$$I_{E1} \approx I_{C1} = I_S \cdot \exp(V_{BE1} / V_T)$$

$$I_{E2} \approx I_{C2} = I_S \cdot \exp(V_{BE2} / V_T)$$

$$I_{E1} = \frac{I_T}{1 + \frac{I_{E2}}{I_{E1}}} = \frac{I_T}{1 + \exp\left(\frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_T}\right)}$$

$$I_{E2} = \frac{I_T}{1 + \frac{I_{E1}}{I_{E2}}} = \frac{I_T}{1 + \exp\left(\frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{V_T}\right)}$$

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

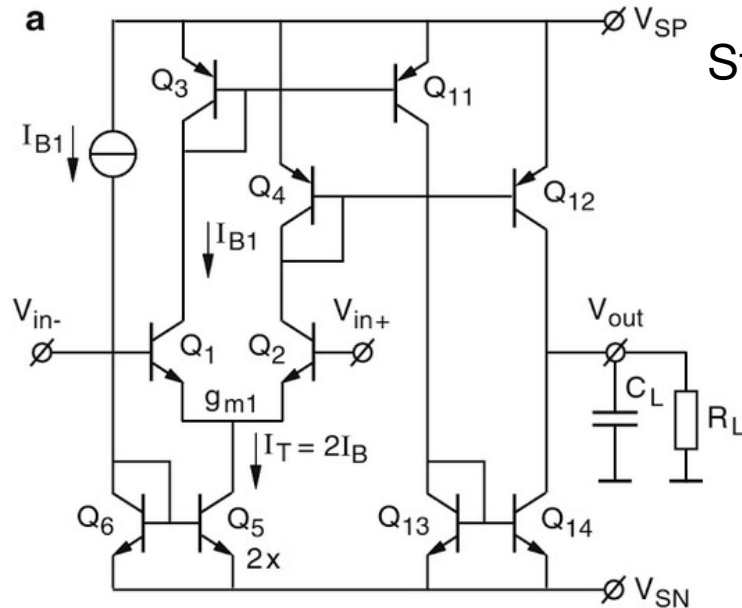


$$x = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_T} = \frac{V_{in}}{V_T}$$

$$I_{E2} = \frac{I_T}{1 + e^{-x}} \cdot \frac{e^{(x/2)}}{e^{(x/2)}} = I_T \frac{e^{(x/2)}}{e^{(x/2)} + e^{-(x/2)}}$$

$$I_{E1} = \frac{I_T}{1 + e^x} \cdot \frac{e^{-(x/2)}}{e^{-(x/2)}} = I_T \frac{e^{-(x/2)}}{e^{-(x/2)} + e^{(x/2)}}$$

# Operacioni transkonduktanski pojačavač



Strujna ogledala: (Q3, Q11), (Q4, Q12), (Q13, Q14)

$$I_{C1} = I_{C11} = I_{C14}$$

$$I_{C2} = I_{C12}$$

$$I_{out} = I_{C14} - I_{C12} = I_{C2} - I_{C1}$$

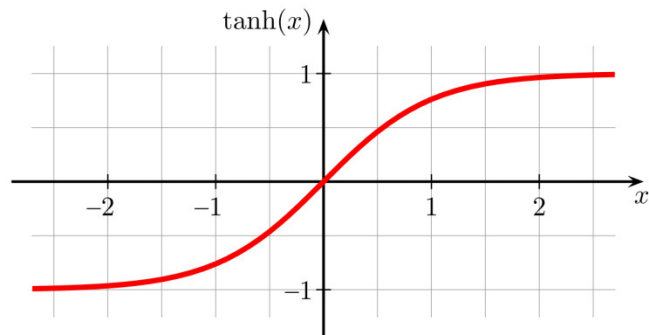
$$I_o = I_{C2} - I_{C1} = I_T \frac{e^{(x/2)} - e^{-(x/2)}}{e^{(x/2)} + e^{-(x/2)}}$$

$$I_o = I_T \cdot \tanh\left(\frac{x}{2}\right) = I_T \cdot \tanh\left(\frac{V_{in}}{2 \cdot V_T}\right)$$

$$g_m = \frac{dI_o}{dV_{in}} = \frac{I_T}{2 \cdot V_T} \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{V_{in}}{2 \cdot V_T}\right)$$

$$g_m = \frac{dI_o}{dV_{in}} \approx \frac{I_T}{2 \cdot V_T} \approx 19.2 \cdot I_T [\text{A}]$$

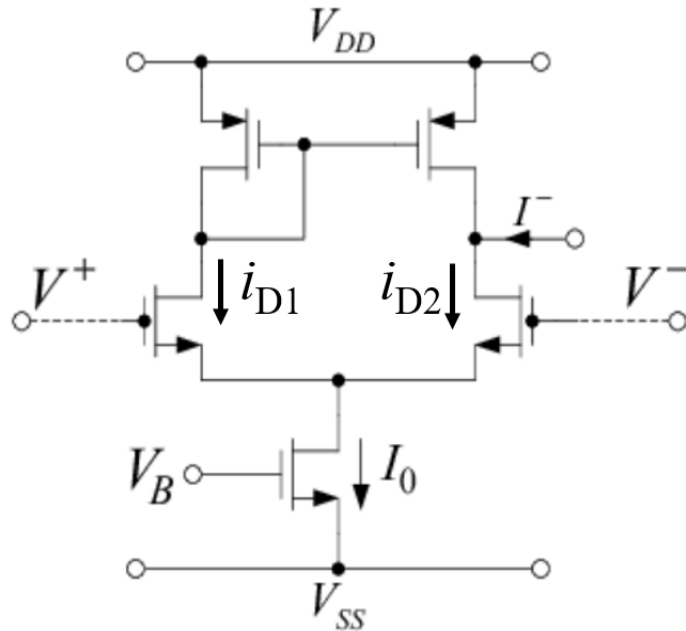
$$g_m = g_m(Q_1) = g_m(Q_2) = \frac{dI_{C1}}{dV_{BE1}}$$



$$x \ll 1 \Rightarrow \tanh(x) \approx x$$

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Jednostepeni OTA (Milerov OTA)



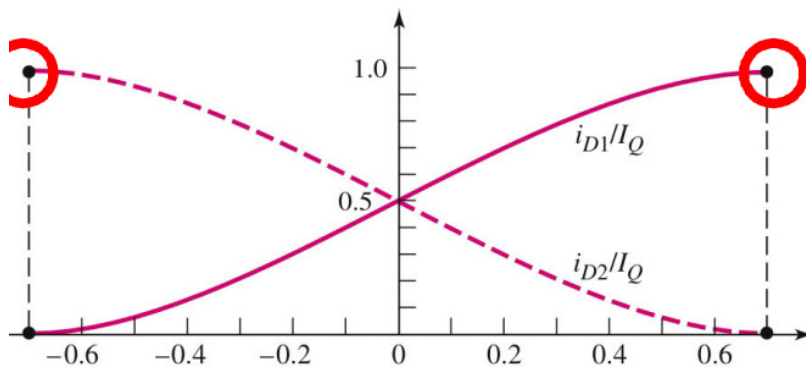
$$i_{D1} = k_n (v_{GS1} - v_{tn})^2$$

$$i_{D2} = k_n (v_{GS2} - v_{tn})^2$$

$$i_{D1} + i_{D2} = I_0$$

$$v_D = v_{GS1} - v_{GS2}$$

Transkonduktansa je nagib DC transfer karakteristike. Maksimalna nagib je za  $v_d=0$  i jednak je polovini transkonduktanse jednog tranzistora diferencijalnog para:

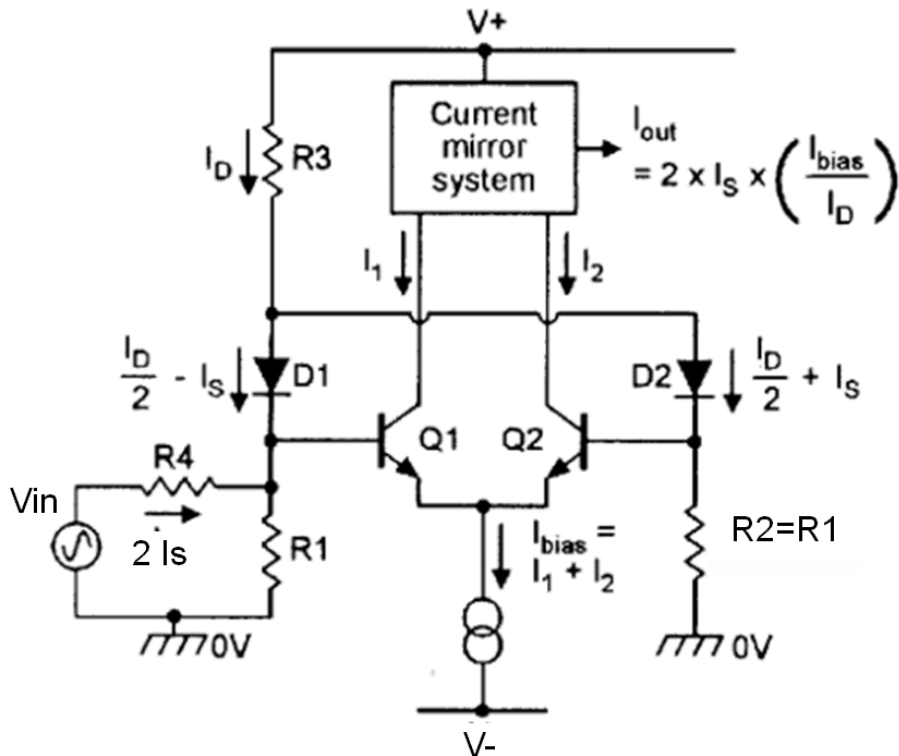


$$g_m(\text{max}) = \left. \frac{di_{D1}}{dv_d} \right|_{v_d=0} = \sqrt{\frac{k_n I_0}{2}} = \frac{g_m(M1)}{2}$$

$$g_m(M1) = \sqrt{2k_n \frac{I_0}{2}}$$

DC prenosna karakteristika  
MOSFET diferencijalnog para

# Primena dioda za linearizaciju



$$V_{D1} + V_{BE1} = V_{D2} + V_{BE2}$$

$$V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right) + V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right) = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S}\right) + V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right)$$

$$I_{D1} \cdot I_{C1} = I_{D2} \cdot I_{C2}$$

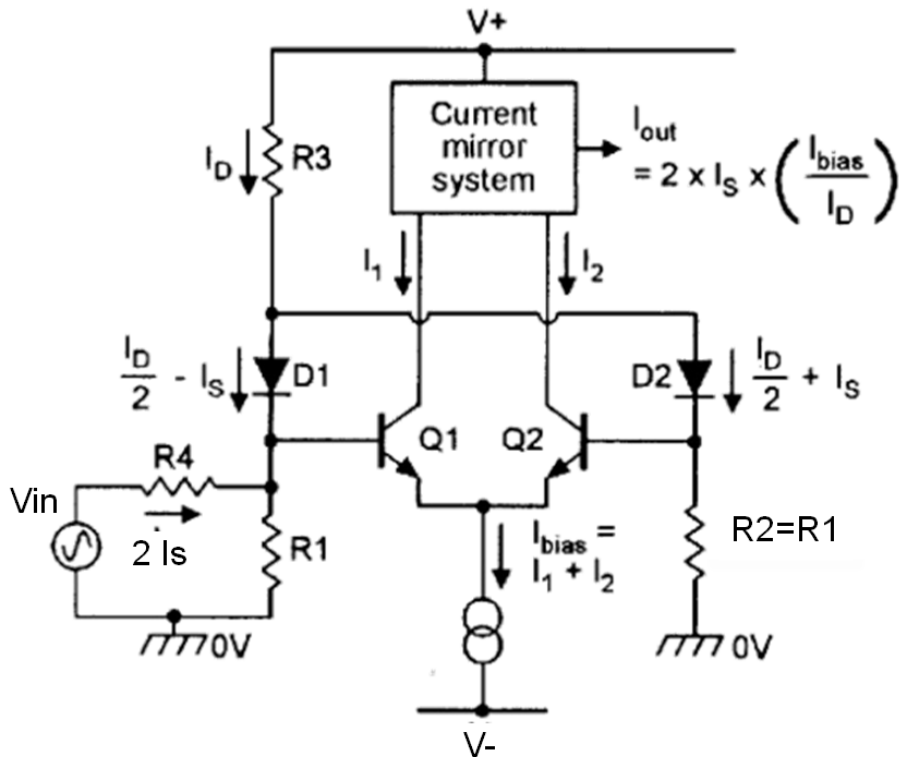
$$\left(\frac{I_D}{2} + i_S\right) \cdot \left(\frac{I_{bias}}{2} - \frac{i_{out}}{2}\right) = \left(\frac{I_D}{2} - i_S\right) \cdot \left(\frac{I_{bias}}{2} + \frac{i_{out}}{2}\right)$$

$$i_{out} = i_S \cdot \frac{2 \cdot I_{bias}}{I_D}$$

- Izraz za izlaznu struju proizilazi iz translinearnog principa.
- Podrazumeva se da je polarizacija realizovana na takav način da je  $I_D$  jednosmerna struja, odnosno da je komponenta naizmenične struje kroz  $R_3$  zanemariva.



# Primena dioda za linearizaciju



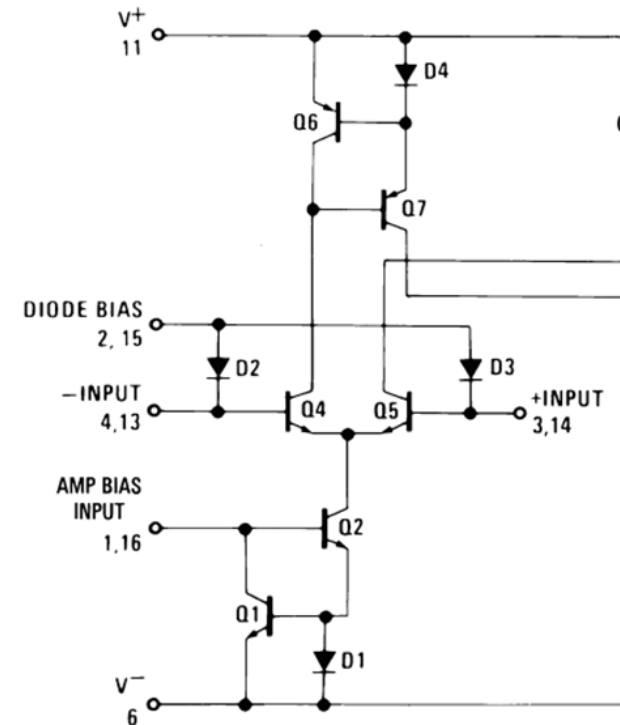
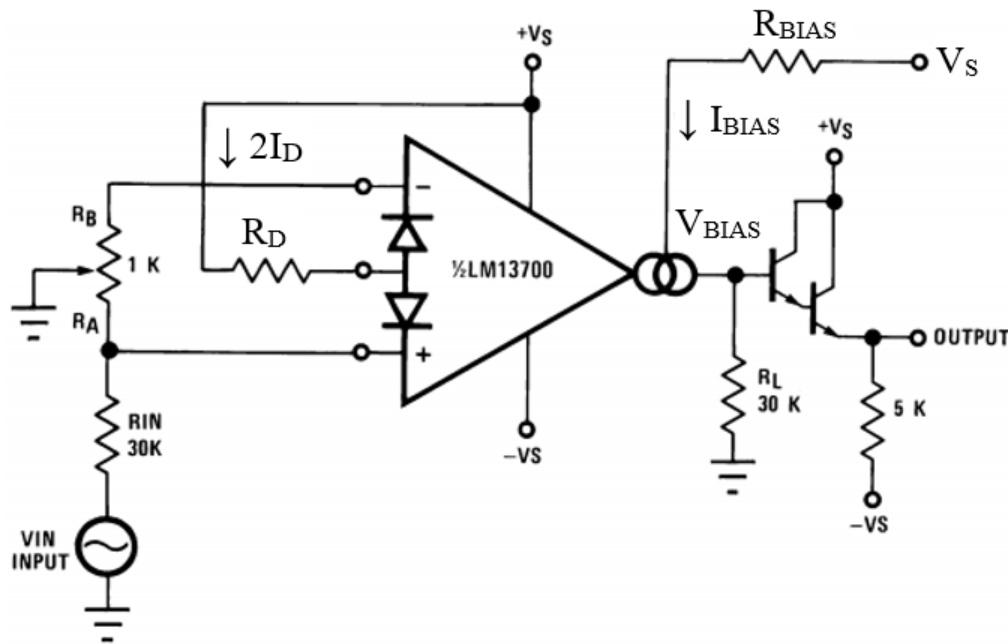
$$i_{out} = i_S \cdot \frac{2 \cdot I_{bias}}{I_D}$$

$$R_{in} \gg R_1 \quad i_s = \frac{v_{in}}{2 \cdot R_{in}}$$

$$g_m = \frac{I_{bias}}{R_{in} \cdot I_D}$$

- Uvođenjem dioda za linearizaciju (D1 i D2) značajno se povećava dinamički opseg ulaznog signala (maksimalna vrednost amplitude ulaznog napona za koju OTA linearno pojačava signal).

# Primer polarizacije OTA



$$I_{BIAS} = \frac{V_S - V_{BIAS}}{R_{BIAS}} = \frac{V_S - (-V_S + 2V_{BE})}{R_{BIAS}}$$

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R_D + \frac{R_B}{2}}$$

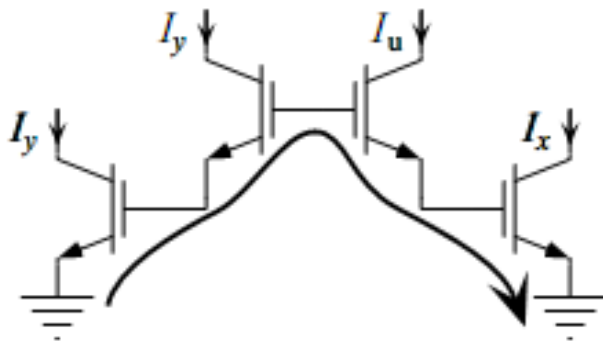
- Struja polarizacije,  $I_{BIAS}$ , koja odgovara struji jednosmernog izvora napajanja diferencijalnog pojačavača određena je spoljnjim komponentama, naponom polarizacije  $V_S$  i otpornikom  $R_{BIAS}$ . Struja koja teče kroz diode  $I_D$  takođe zavisi od spoljnjih komponenata, napona polarizacije  $V_S$  i otpornika  $R_D$ . Strujama  $I_D$  i  $I_{BIAS}$  definisana je vrednost transkonduktanse OTA.

# Primena dioda za linearizaciju

## Translinearni princip

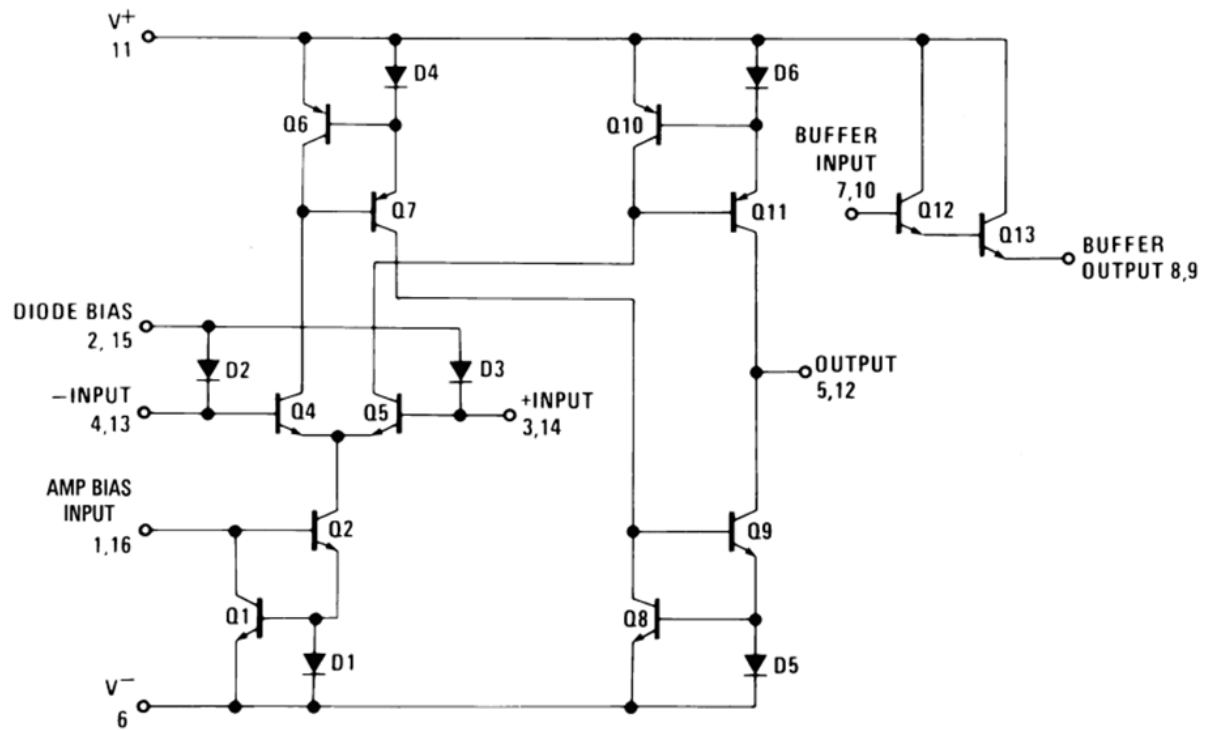
Ukoliko kontura sadrži isključivo translinearne elemente (komponente sa eksponencijalnom zavisnošću struje od napona – diode ili bipolarni tranzistori) koji se mogu podeliti u dve grupe, grupu elemenata čija orjetnacija napona odgovara smeru kazaljke na satu i drugu grupu translinearnih elemenata čiji naponi su orjentisani u suprotnom smeru tada se može uspostaviti veza između struja kroz elemente. Proizvod struja svih elemente čiji su naponi orjentisane u jednom pravcu jednak je proizvodu struja preostalih elmenata u konturi (čiji su naponi orjetisani u suprotnom smeru).

$$\prod_{k \in CW} i_k = \prod_{j \in CCW} i_j$$

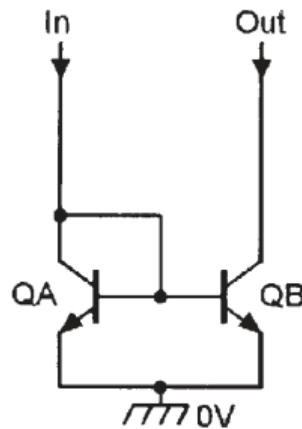


$$I_y \cdot I_y = I_u \cdot I_x$$

# LM13700

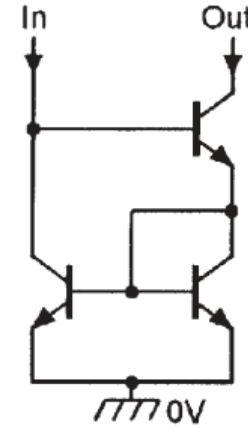


# Strujna ogledala



$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\beta}{2 + \beta}$$

$$R_{out} = r_o = \frac{1}{h_{22EB}}$$



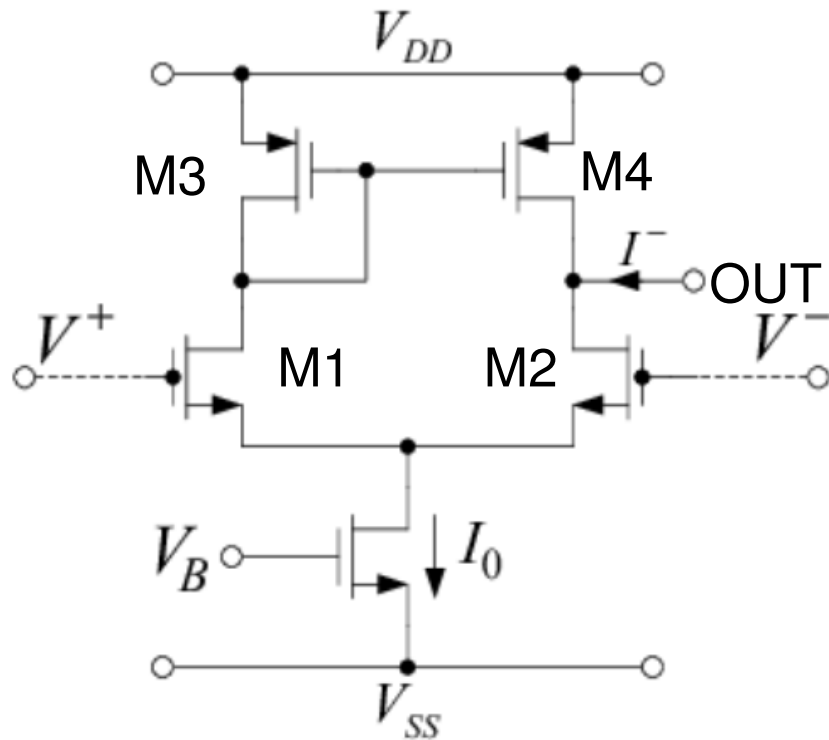
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\beta^2 + 2 \cdot \beta}{\beta^2 + 2 \cdot \beta + 2}$$

$$R_{out} = \frac{\beta \cdot r_o}{2}$$

- U Wilson-ovom strujnom izvoru odnos između ulazne i izlazne struje manje zavisi od koeficijenta strujnog pojačanja,  $\beta$ . Ova činjenica ima poseban posebn značaj kada se primenjuju pnp tranzistori.
- Izlazna otpornost Wilsonovog strujnog izvora je veća za  $\beta/2$ .

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

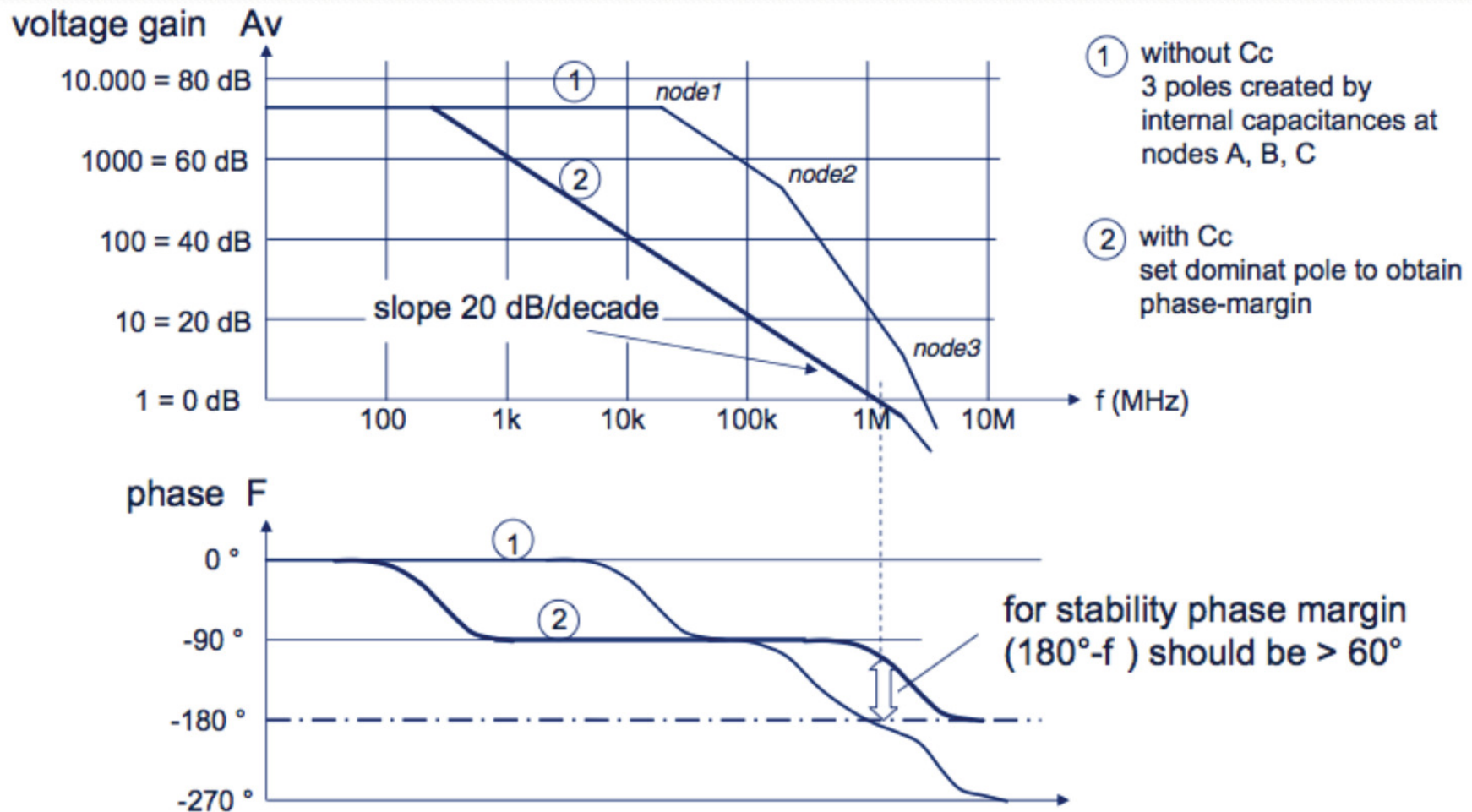
## Jednostepeni OTA (Milerov OTA)



Pravila za dimenzionisanje tranzistora:

- Za M1 i M2 odabrati veliku vrednost širine kanala da bi se dobila veća transkonduktansa.
- Za M3 and M4 usvojiti veću vrednost za dužinu kanala da bi se dobilo veće pojačanje i manja vrednost ofseta.

# Operacioni transkonduktanski pojačavač



# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Poređenje bipolarnog i MOSFET OTA

**Bipolar:**  $g_m$  increases linear with current

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

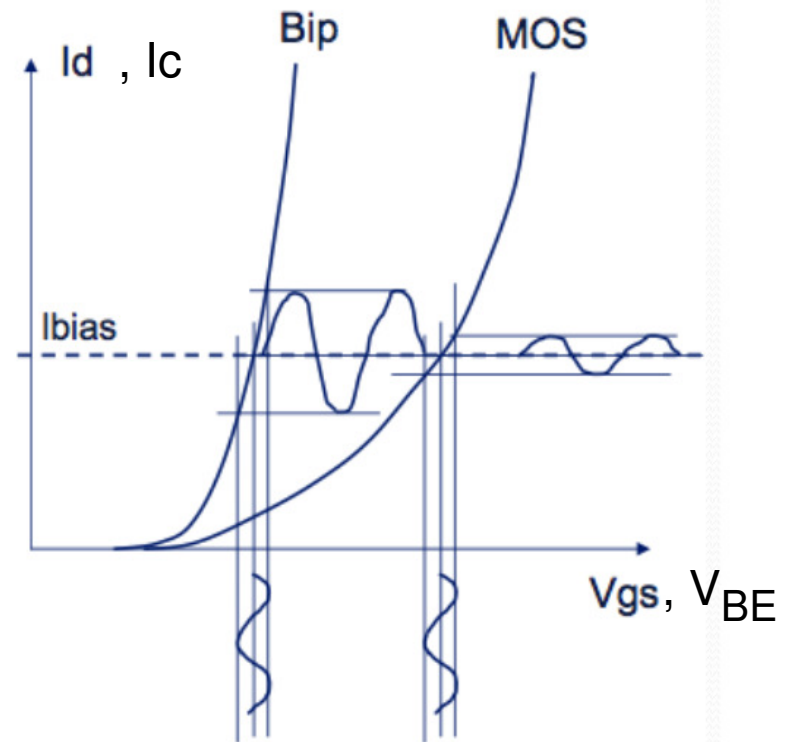
$$g_m = \frac{d I_C}{d V_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

**MOS:**  $g_m$  increases with squareroot of current

$$I_d = k \cdot \frac{w}{l} \cdot (V_{gs} - V_{th})^2$$

$$g_m = \frac{d I_d}{d V_{be}} = k \cdot \frac{w}{l} \cdot 2 \cdot (V_{gs} - V_{th})$$

$$g_m = 2 \cdot \sqrt{k \cdot \frac{w}{l} \cdot I_d}$$



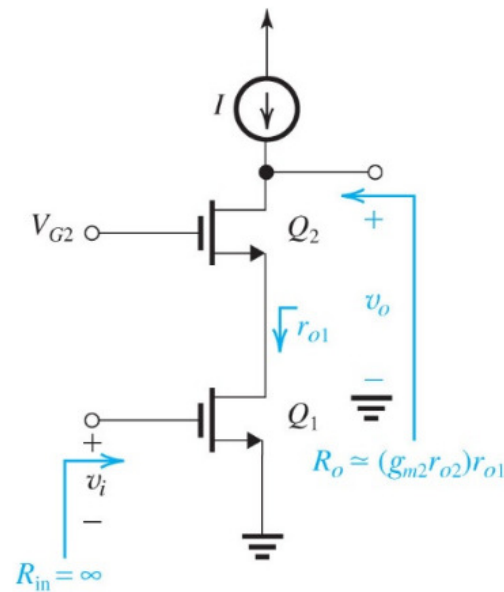
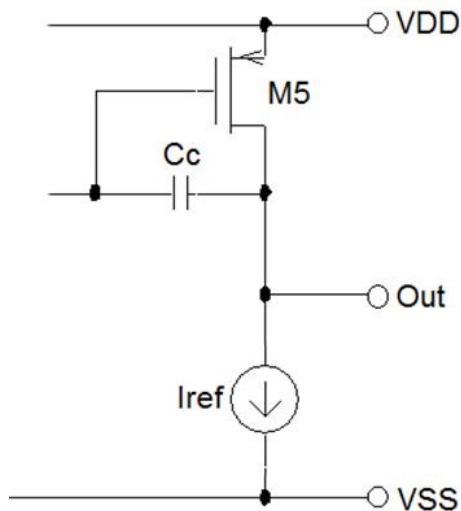
bipolar transistor will achieve more  $g_m$



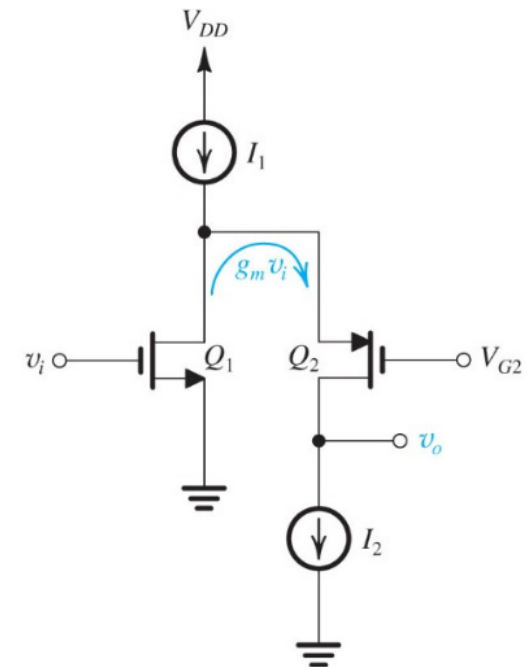
# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Izlazni stepen OTA

- **Pojačavač u sprezi sa zajedničkim sorsom**
- **Kaskodni pojačavač** Odlikuje ga velika izlazna otpornost i pojačanje  
 $R_0 \approx r_{o1} \cdot r_{o2} \cdot g_{m2}$
- **Preklopoljeni kaskodni pojačavač** (Folded cascode) projektuje se na isti način kao i običan kaskodni pojačavač samo je način polarizacije drugačiji. Prednost je što izborom vrednosti napajanja  $V_B$  može da se postavi radna tačka izlaznog tranzistora i omogući veći dinamički opseg.



(a)

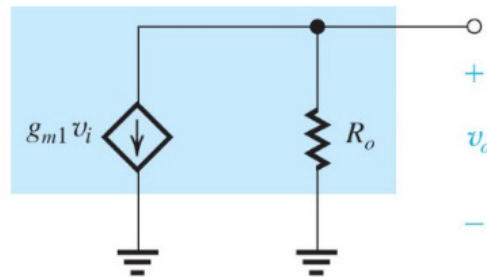
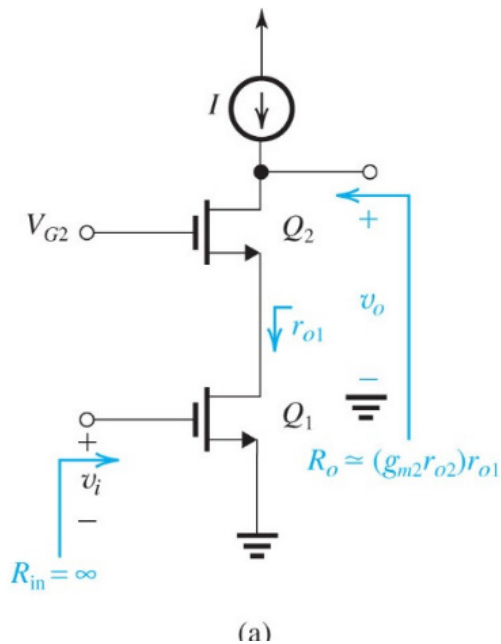


# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Izlazni stepen OTA

### • Kaskodni pojačavač

Prvi tranzistor Q1 je u sprezi sa zajedničkim sorsom a drugi tranzistor Q2 u sprezi sa zajedničkim gejtom. Izlazna otpornost je znatno uvećana u odnosu na običan pojačavač sa zajedničkim sorsom:  $R_o \approx r_{o1} \cdot r_{o2} \cdot g_{m2}$



$$R_o = r_{o2} + (g_{m2} r_{o2}) r_{o1} \approx (g_{m2} r_{o2}) r_{o1}$$

$$A_{v_o} = -g_{m1} R_o = -g_{m1} (g_{m2} r_{o2}) r_{o1}$$

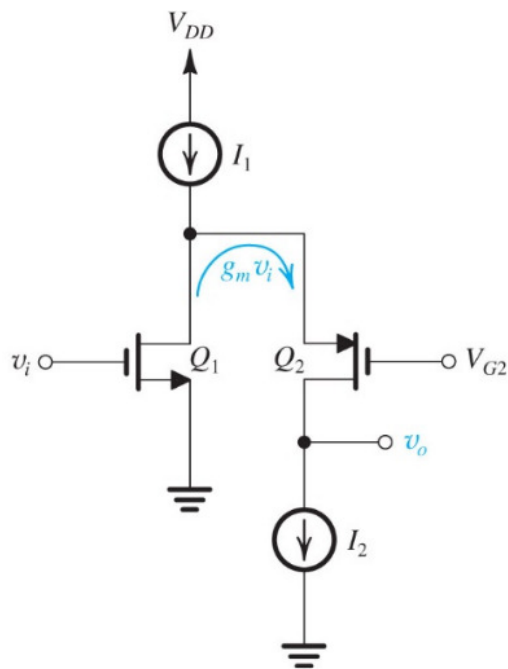
$$A_{v_o} = -(g_{m1} r_{o1}) (g_{m2} r_{o2})$$

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

## Izlazni stepen OTA

- **Preklopljeni kaskodni pojačavač** (Folded cascode)

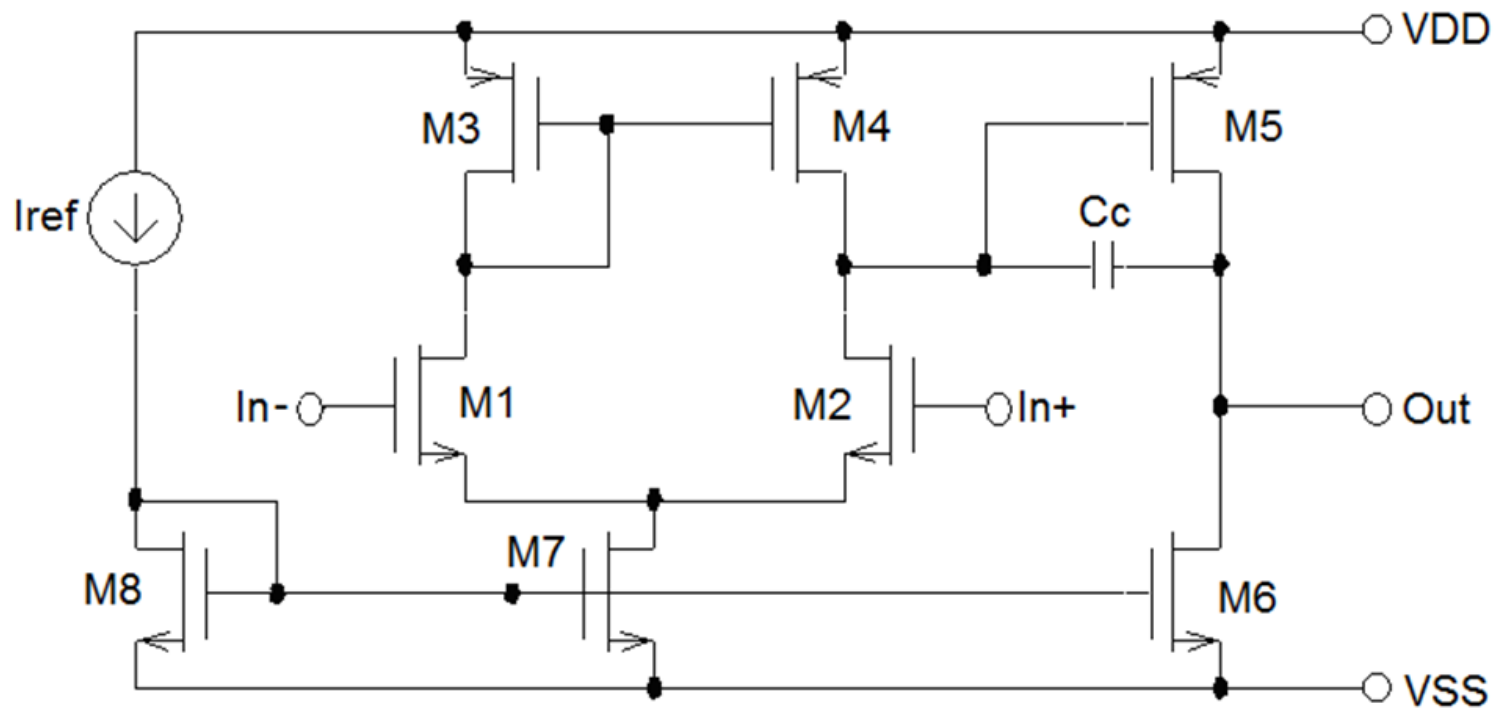
Jedina razlika u odnosu na standardni kaskodni pojačavač je u načinu polarizacije. Ovakav način polarizacije omogućava znatno veći dinamički opseg. Koristi se u slučaju kada je vrednost napajanja  $V_{DD}$  mala.



Q1 je polarisan strujnom  $I_1$ - $I_2$   
Q2 je polarisan strujnom  $I_2$

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

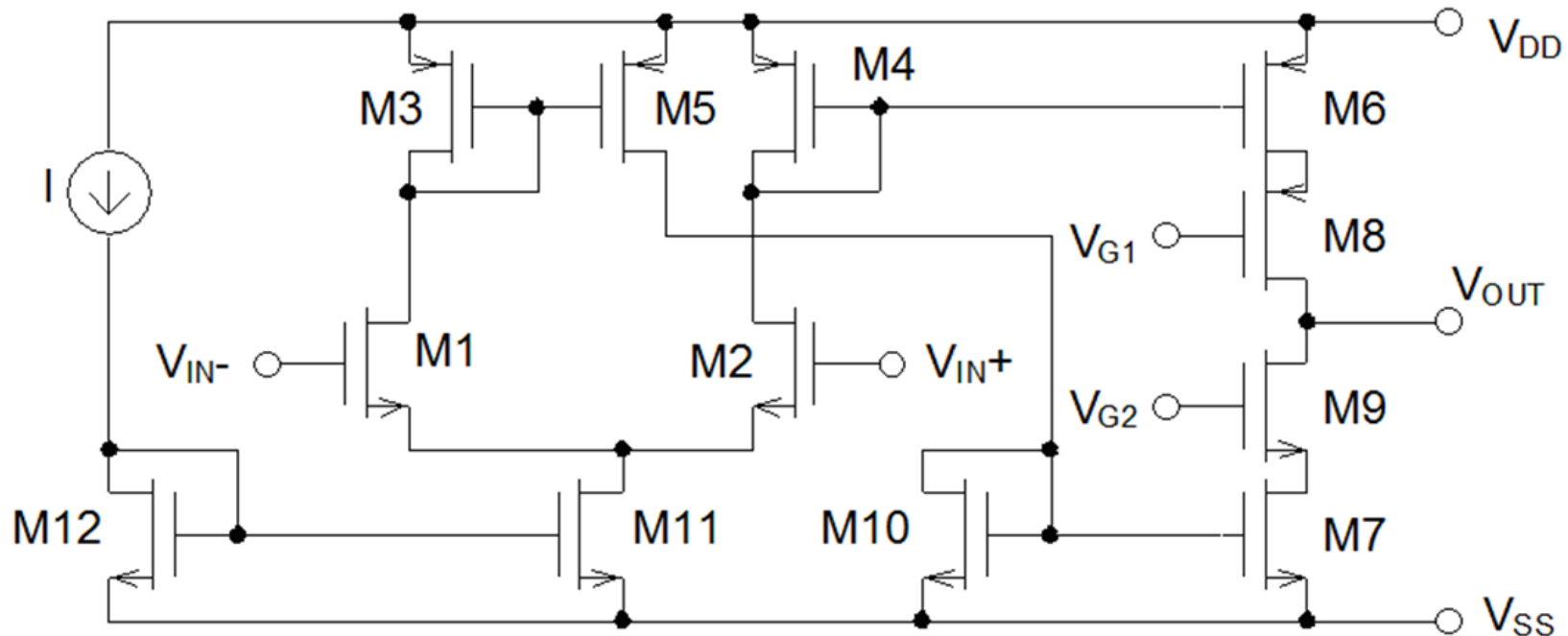
## Dvostepeni OTA (Milerov OTA)



Tranzistor M5 je u sprezi sa zajedničkim sorsom koja ima veliku izlaznu otpornost. Da bi se koristio 2-stepeni OTA u kolima sa povratnom spregom neophodno je dodati kompenzacioni kondenzator  $C_C$  ili kompenzaciono kolo R+C.

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

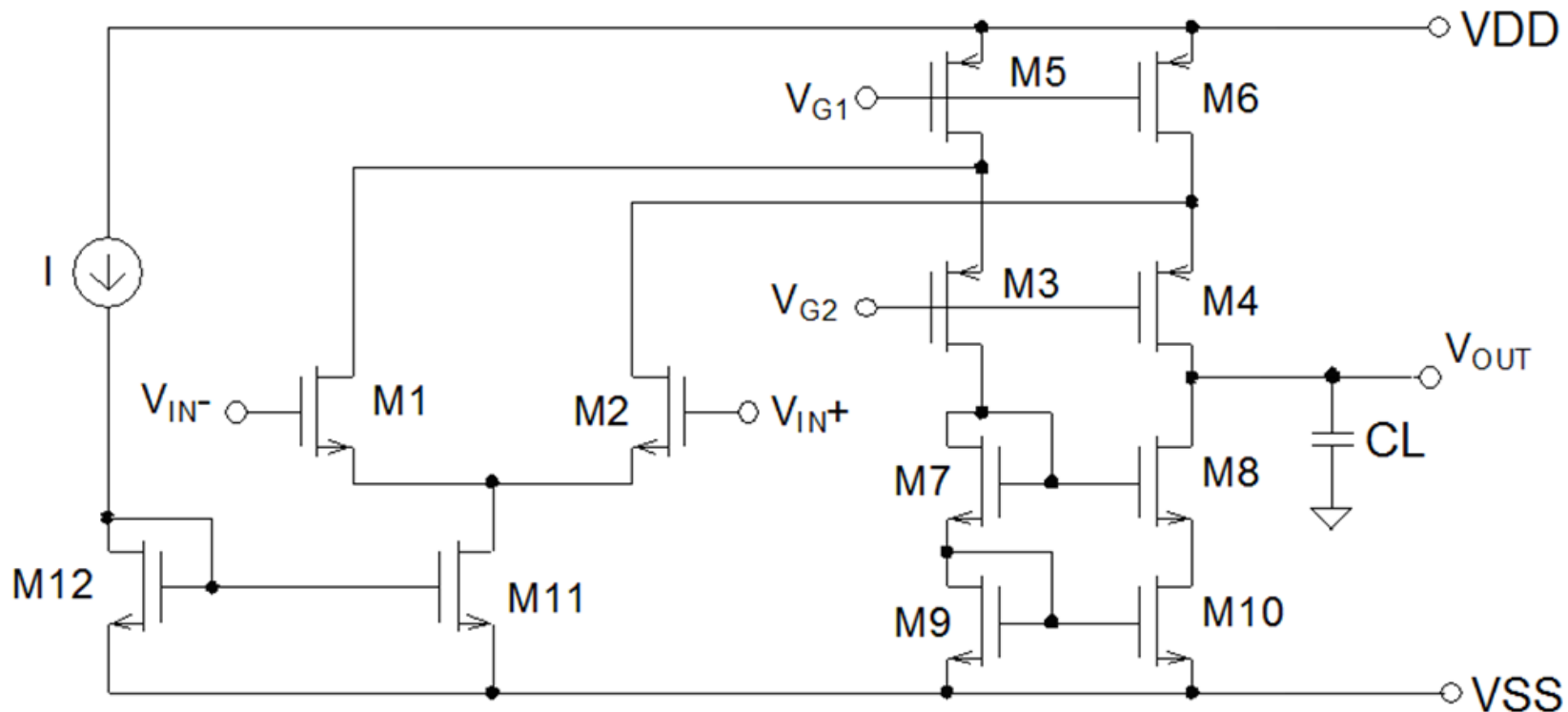
## Kaskodni OTA



Strujna ogledala omogućavaju da  $I_{D7} = I_{D1}$  kao i  $I_{D6} = I_{D2}$   
M8 i M9 su povezani u sprezi sa zajedničkim gejtom  
M6 i M8 čine kaskodni pojačavač  
M7 i M9 čine drugi kaskodni pojačavač

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

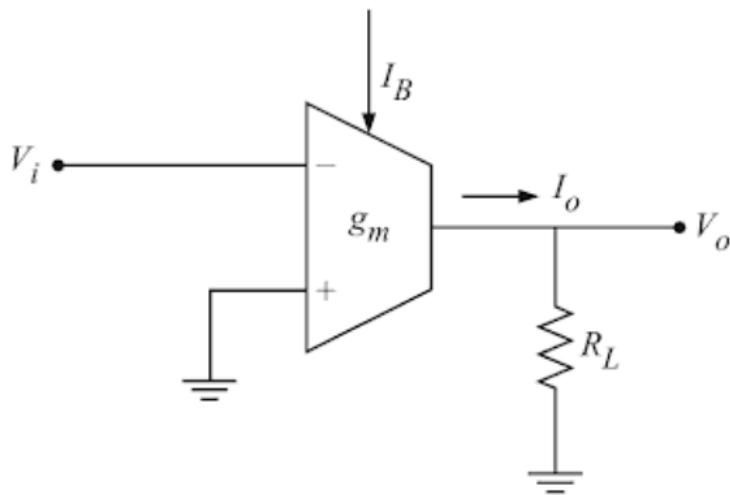
## Presavijeni kaskodni OTA (Folded cascode )



- M3 i M4 su povezani u sprezi sa zajedničkim gejtom
- M5 i M6 imaju funkciju izvora konstantne struje
- M7-M10 strujno ogledalo koje polariše M3 i M4 i prevodi simetričan signal na nesimetričan izlaz

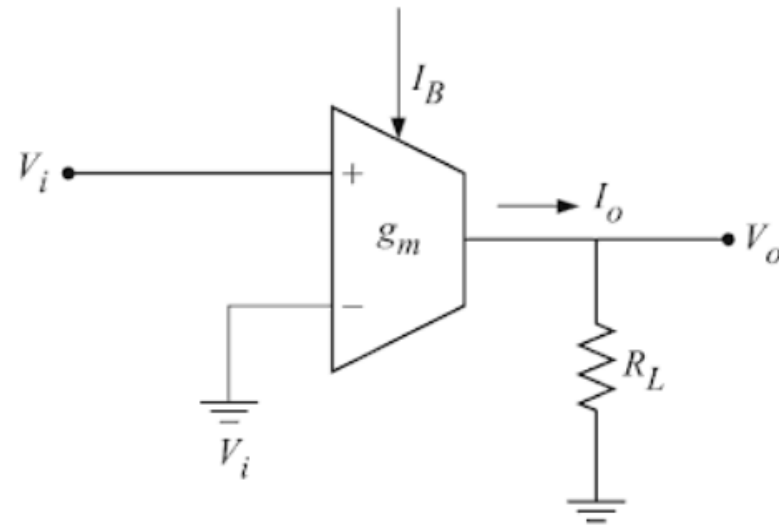
# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Invertujući i neinvertujući pojačavač realizovan sa jednim OTA



$$\frac{V_0}{V_{in}} = -g_m \cdot R_L$$

$$Z_{out} = R_L$$



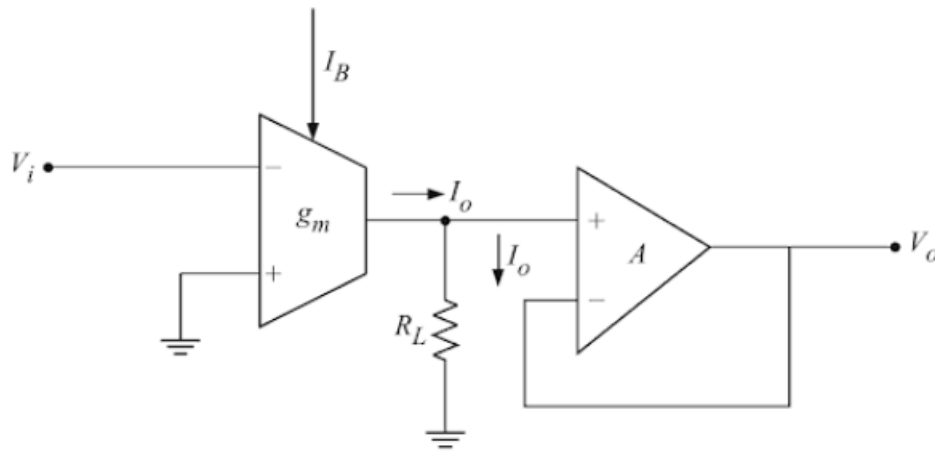
$$\frac{V_0}{V_{in}} = g_m \cdot R_L$$

$$Z_{out} = R_L$$

- Naponsko pojačanje se može jednostavno podešavati jer je direktno proporcionalno transkonduktansi  $g_m$ .
- Ova kola odlikuje velika izlazna otpornost.

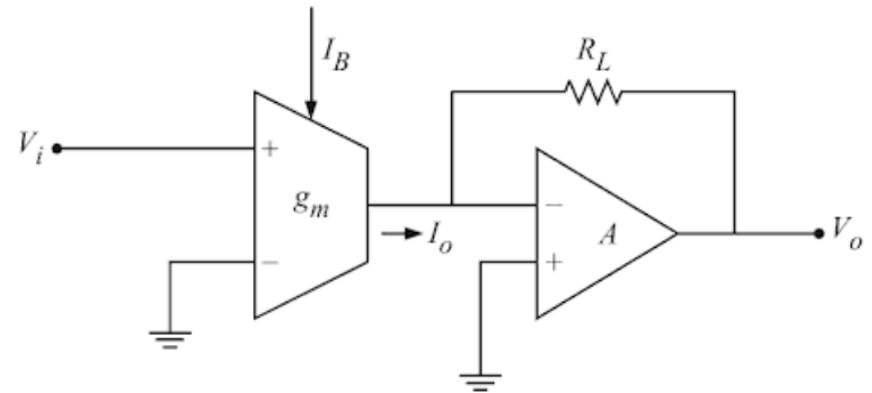
# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Baferski invertujući pojačavač realizovan sa jednim OTA



$$\frac{V_o}{V_{in}} = -g_m \cdot R_L$$

$$Z_{out} = 0$$



$$\frac{V_o}{V_{in}} = -g_m \cdot R_L$$

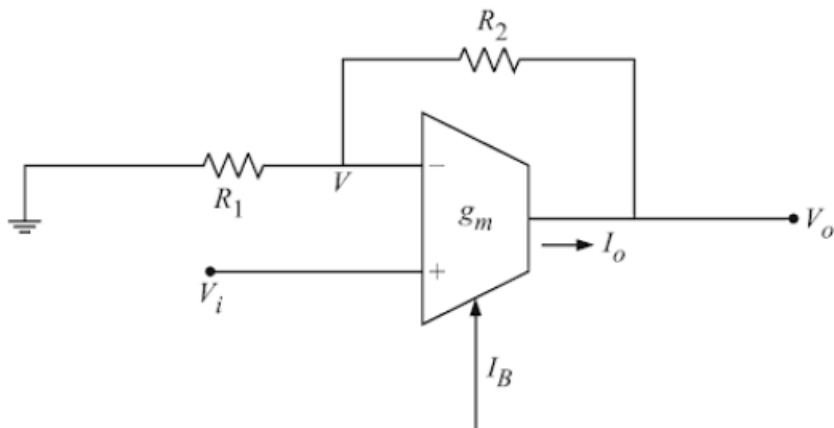
$$Z_{out} = 0$$

- Zahvaljujući baferskom stepenu imaju malu izlaznu otpornost.
- Granična frekvencija je veoma velika i jednaka približno frekvenciji jediničnog pojačanja (gain bandwidth, GB):  $f_{3dB} = GB$



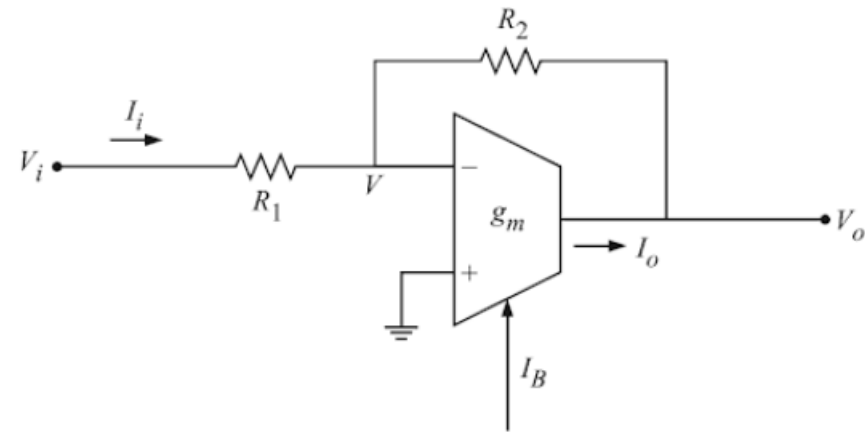
# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Invertujući i neinvertujući pojačavač realizovani povratnom spregom



$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{g_m \cdot (R_1 + R_2)}{1 + g_m \cdot R_1}$$

$$R_0 = \frac{R_1 + R_2}{1 + g_m \cdot R_1}$$



$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1 - g_m \cdot R_2}{1 + g_m \cdot R_1}$$

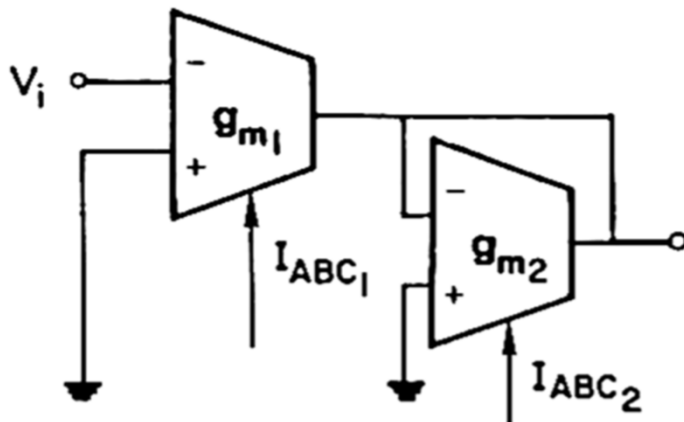
$$R_0 = \frac{R_1 + R_2}{1 + g_m \cdot R_1}$$

- Postoji nelinearna zavisnost pojačanja od transkonduktanse.
- Istim kolom se može dobiti i pozitivno i negativno pojačanje za određene vrednosti transkonduktanse  $g_m$
- Ukoliko se promene ulazni priključci ovim koliima se mogu realizovati velika pojačanja za  $g_m=1/R_1$ .

# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Invertujući pojačavač realizovan sa dva OTA

Kolo ne sadrži pasivne komponente.  
Naponsko pojačanje i izlazna otpornost se mogu  
podešavati spoljnjim strujama

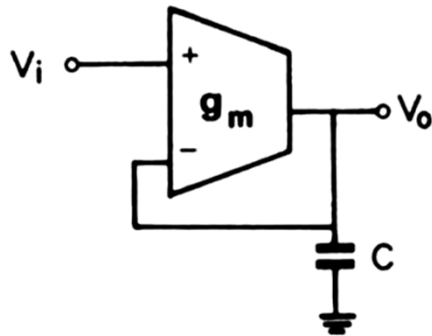


$$\frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

$$R_0 = \frac{1}{g_{m2}}$$

# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

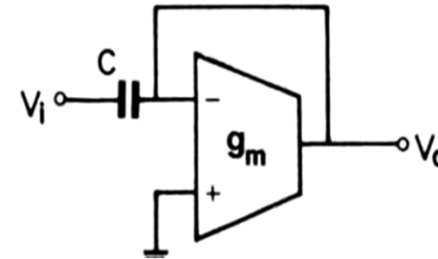
## Filtarske sekcije prvog reda



$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{g_m}{sC + g_m}$$

$$f_{3dB} = \frac{g_m}{2 \cdot \pi \cdot C}$$

Propusnik niskih frekvencija čija je granična frekvencija direktno srazmerna transkonduktansi  $g_m$ .



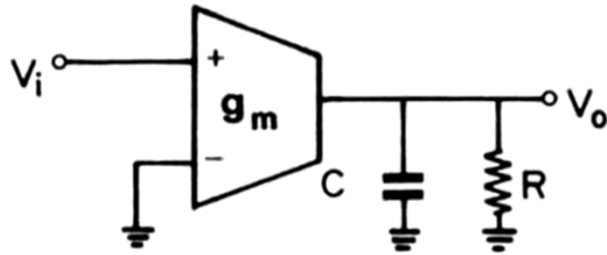
$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{sC}{sC + g_m}$$

$$f_{3dB} = \frac{g_m}{2 \cdot \pi \cdot C}$$

Propusnik visokih frekvencija čija je granična frekvencija direktno srazmerna transkonduktansi  $g_m$ .

# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Filtarske sekcije prvog reda

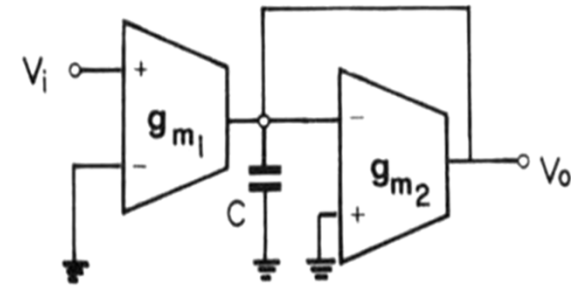


$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m \cdot R}{1 + sC \cdot R}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{C \cdot R}$$

$$A_0 = g_m \cdot R$$

NF filtarska sekcija čije se jednosmerno pojačanje može podešavati promenom transkonduktanse  $g_m$ .



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{g_{m1}}{g_{m2}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \frac{C}{g_{m2}}}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{g_{m2}}{C}$$

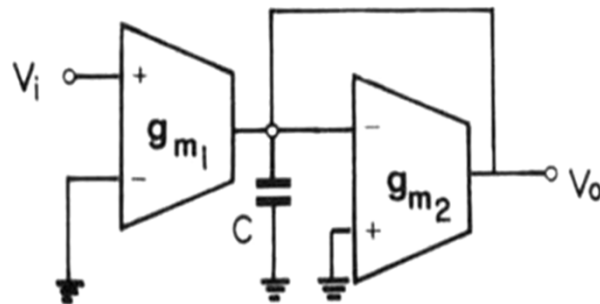
$$A_0 = \frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

NF filtarska sekcija čija se granična frekvencija i jednosmerno pojačanje mogu podešavati promenom transkonduktansi  $g_{m1}$  i  $g_{m2}$ .

# Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

## Aktivni filter realizovan primenom OTA

- Primenom OTA može se realizovati veliki broj različitih konfiguracija aktivnih filtara. Kod ovih filtara je moguće podešavati pojačanje, kritične frekvencije ili istovremeno oba ova parametra. Postoji čak i mogućnost da se promeni tip filtra kontinualnom promenom transkonduktanse.
- U filterskoj sekciji prvog reda OTA označen sa  $G_{m2}$  povezan je na takav način da predstavlja otpornik kontrolisan naponom,  $R=1/g_{m2}$ .



$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{m2} + sC}$$

$$f_{3dB} = -\frac{g_{m2}}{2 \cdot \pi \cdot C}$$

### Najznačajnije primene OTA:

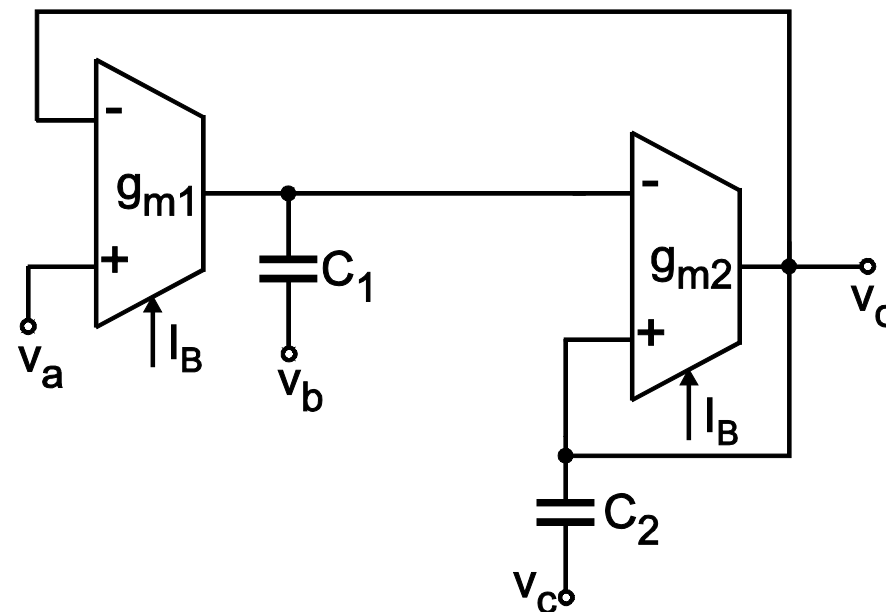
- Naponom kontrolisani pojačavači
- Naponom kontrolisane otpornosti
- Naponom kontrolisani filtri
- Naponom kontrolisani oscilatori (harmonijski i relaksacioni)
- Modulatori
- Naponski komparatori

# Operacioni transkonduktanski pojačavač

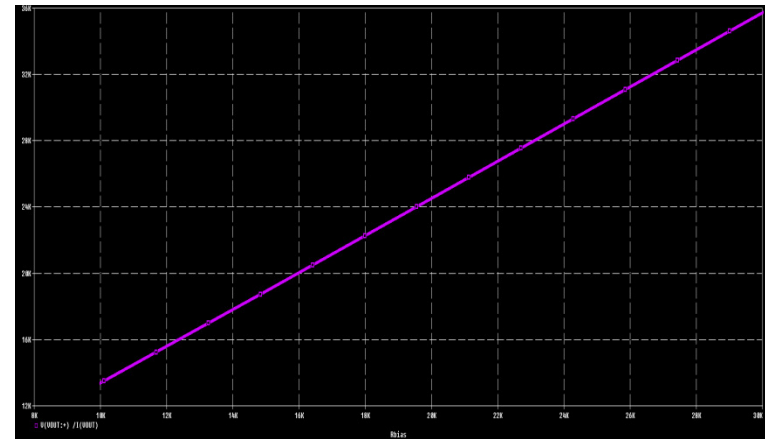
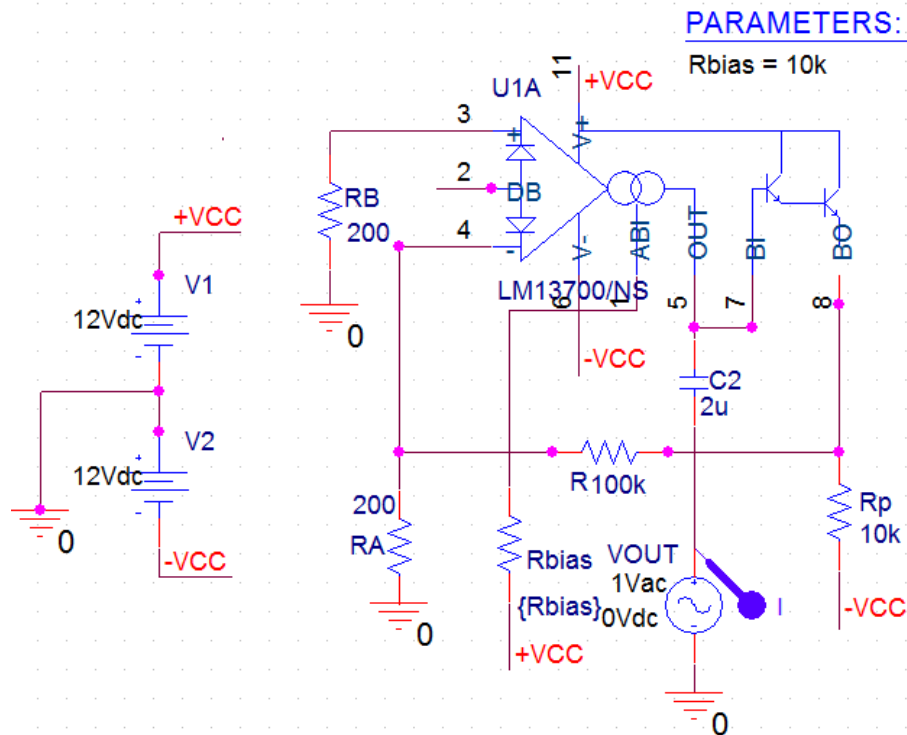
## 5.2. Zadatak

Na slici je prikazan aktivni filter drugog reda realizovan primenom dva OTA. Odrediti tip prenosnih funkcija, moduo pola i Q faktor pola u slučaju kada je:

- a)  $V_{in} = V_a, V_b = V_c = 0$ ;
- b)  $V_{in} = V_b, V_a = V_c = 0$ ;
- c)  $V_{in} = V_c, V_a = V_b = 0$ .



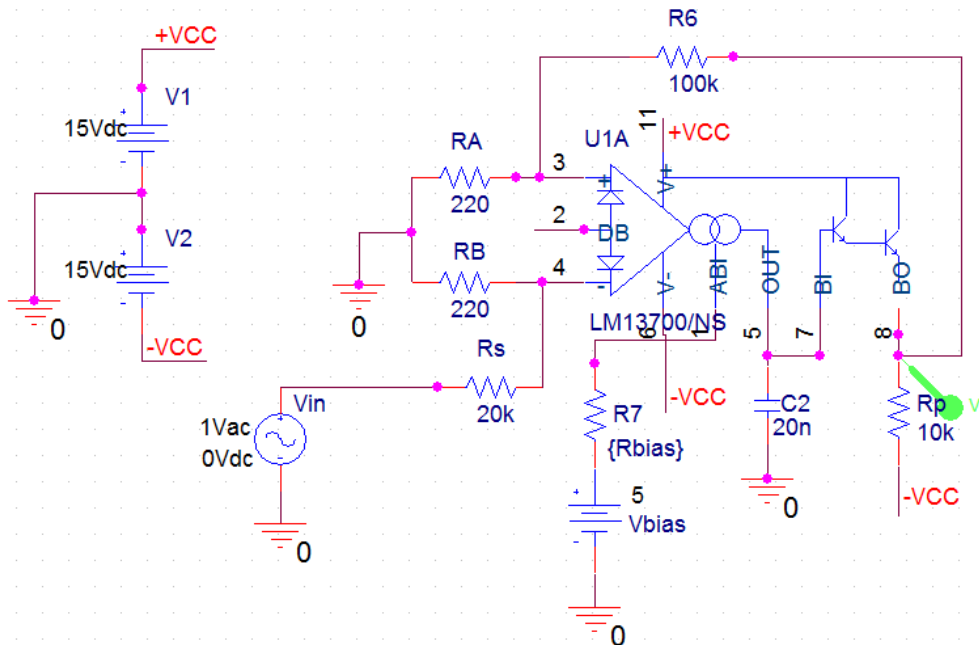
# Promenljiva dinamička otpornost realizovana primenom OTA



$$R_X = \frac{R + R_A}{g_m \cdot R_A}$$

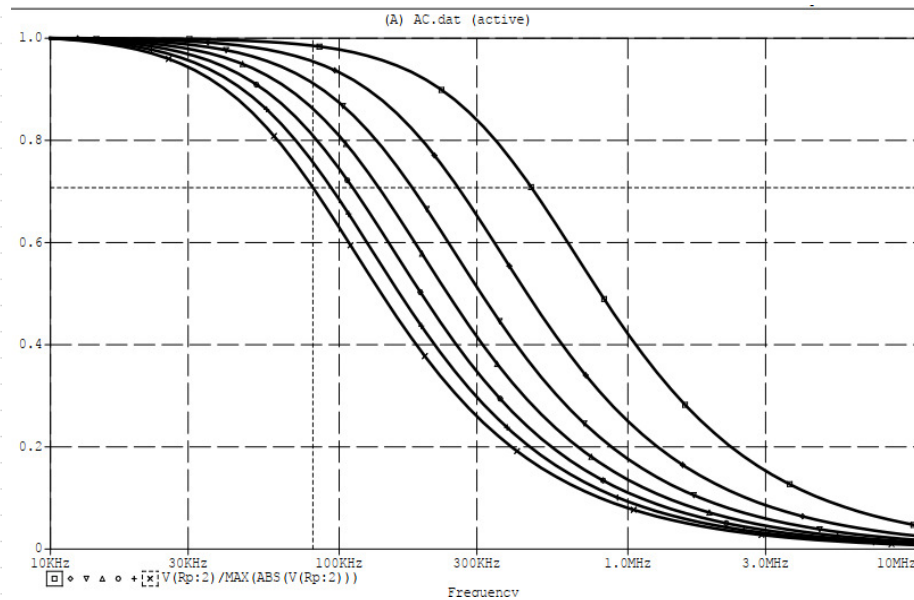


# Naponom kontrolisani aktivni filtar primenom OTA



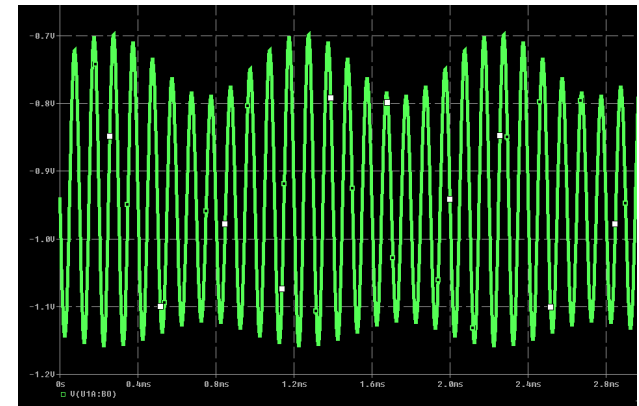
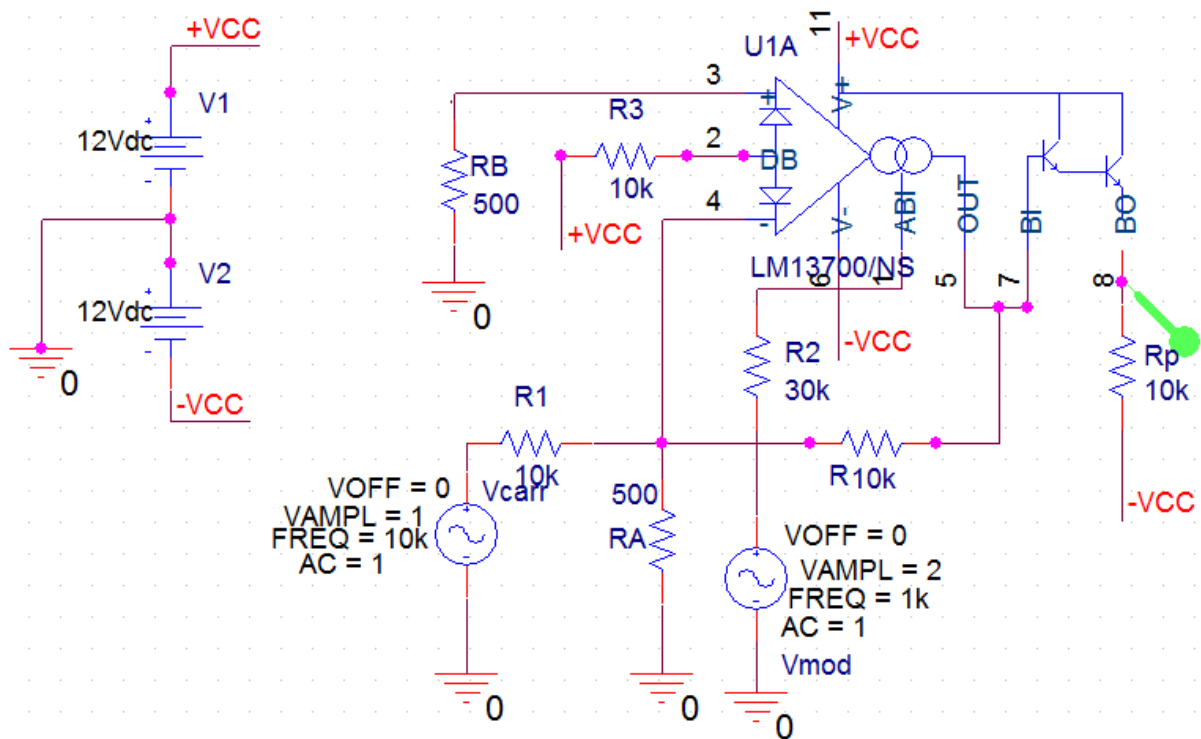
## PARAMETERS:

Rbias = 10k

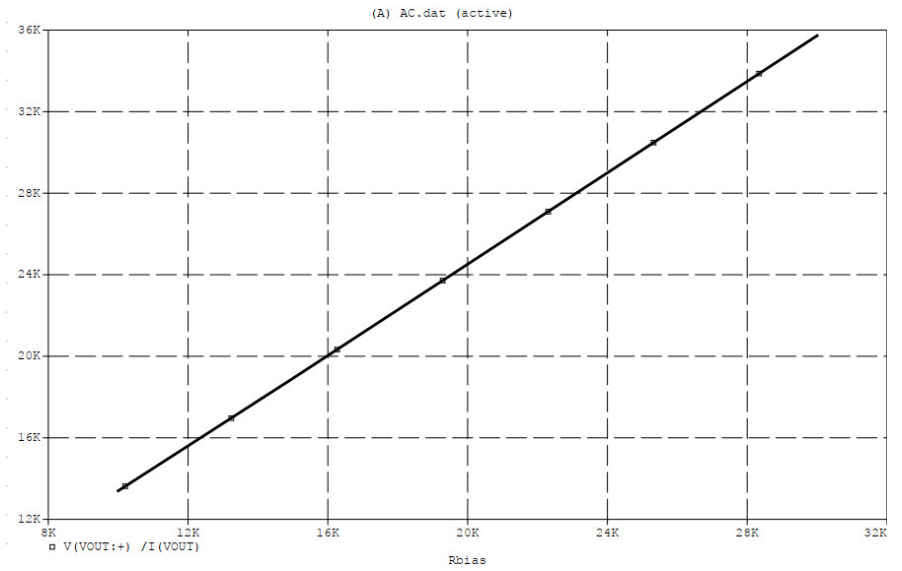
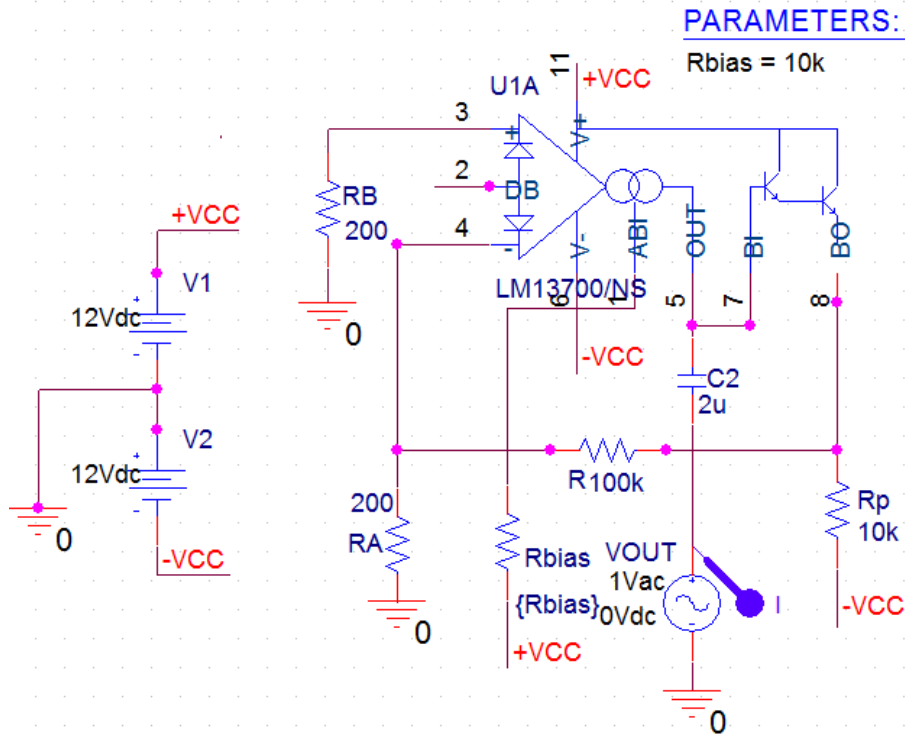


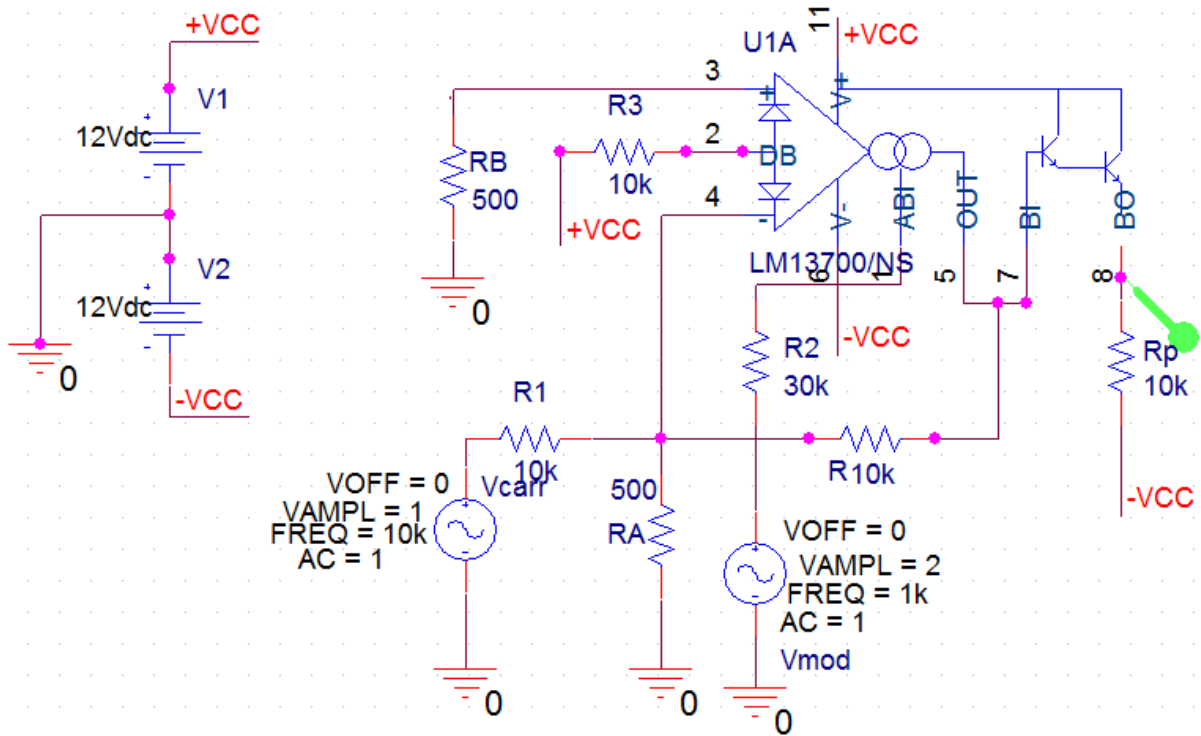
$$f_o = \frac{R_A \cdot g_m}{2 \cdot \pi \cdot (R_A + R) \cdot C}$$

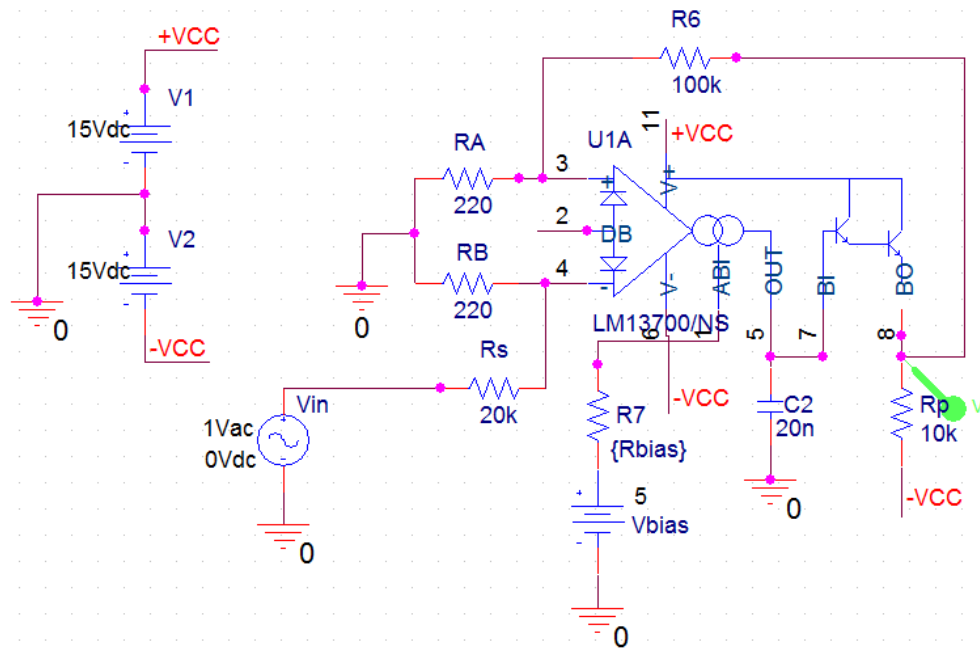
# Amplitudska modulacija primenom OTA



# Promenljiva dinamička otpornost primenom OTA







**PARAMETERS:**

Rbias = 10k

## Transkonduktanski operacioni pojačavač

### Osnovna pitanja

1. Simbol OTA, razlike između OTA i standardnog operacionog pojačavača.
2. Model idealnog transkonduktanskog operacionog pojačavača i osobine idealnog OTA.
3. Struktura transkonduktanskog operacionog pojačavača.

### Ostala pitanja

4. OTA bez dioda za linearizaciju, proračun transkonduktanse.
5. OTA sa diodama za linearizaciju, proračun transkonduktanse.
6. Dvostepeni Milerov OTA (električna šema).
7. Izlazni stepen OTA realizovanog u MOSFET tehnologiji (šeme izlaznih stepena).
8. Invertujući i neinvertujući pojačavači sa i bez povratne sprege.
9. Filtarske sekcije prvog reda realizovane primenom OTA.