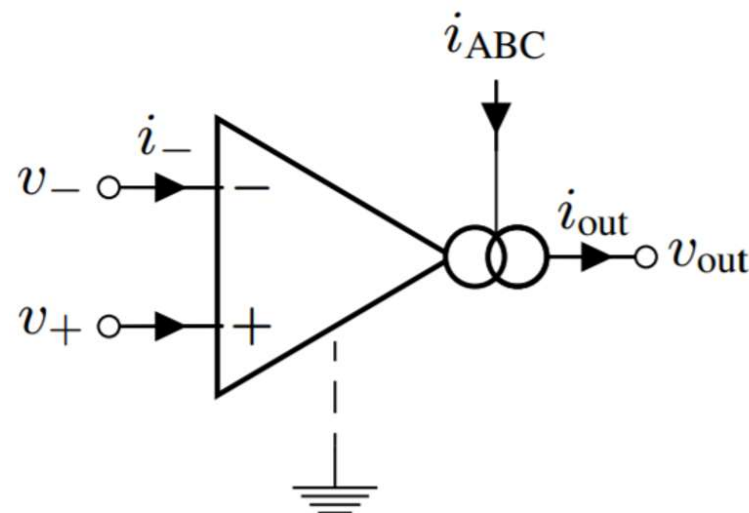
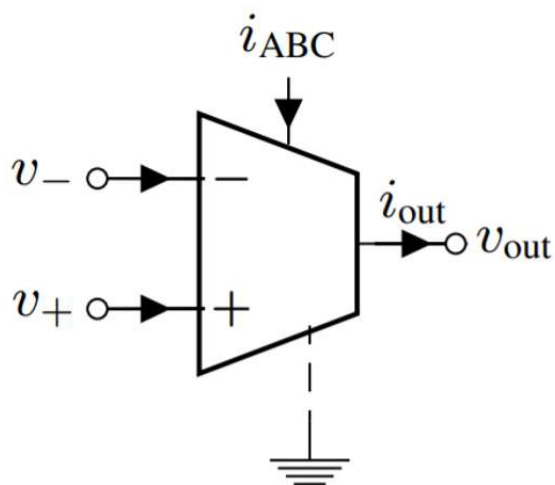


Operacioni transkonduktanski pojačavač
(Operational Transconductance Amplifier – OTA)

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 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 polarizacije i_{ABC} ili napona polarizacije v_{ABC} . Preko ovog ulaza menja se vrednost transkonduktanse.



Operacioni transkonduktanski pojačavač

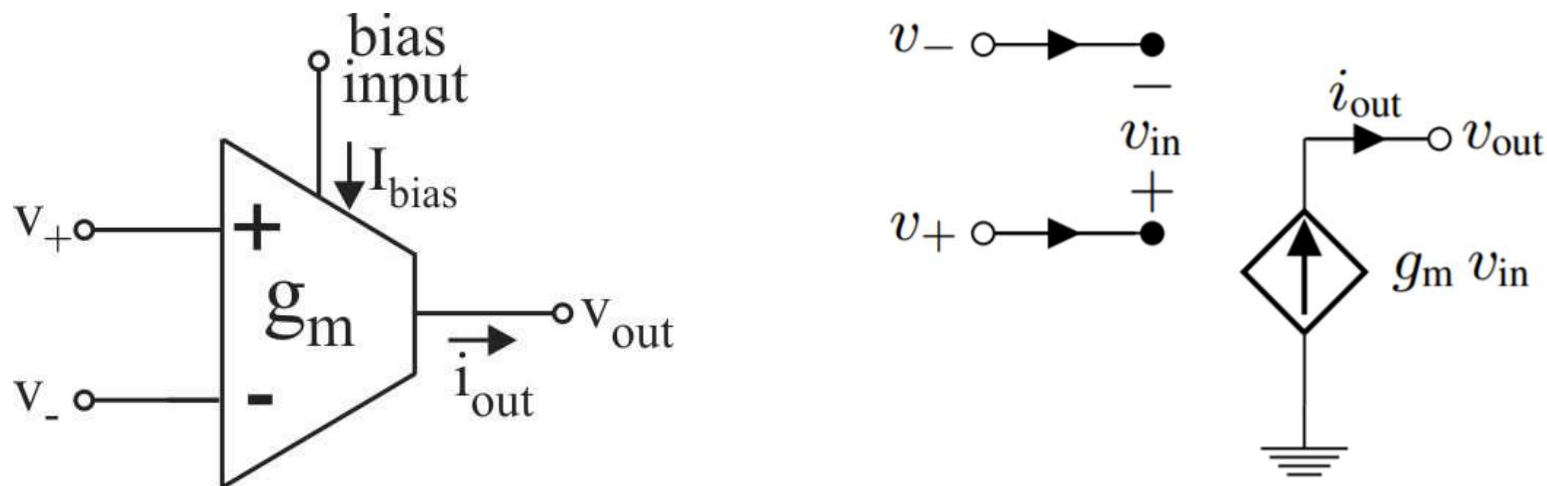
Razlike između operacionog pojačavača i OTA

- 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 koja sadrže 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 standardni operacioni pojačavač ima veoma malu izlaznu otpornost jer se na izlaznom pristupu ponaša kao naponski generator.
- U svakom linearnom kolu, 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

- Izlazna struja je srazmerna ulaznom diferencijalnom naponu $i_{out} = g_m(v_+ - v_-)$, dok je transkonduktansa g_m konačna i linearno srazmerna struji polarizacije: $g_m = k \cdot I_{ABC}$
- 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 $\omega_0 \rightarrow \infty$

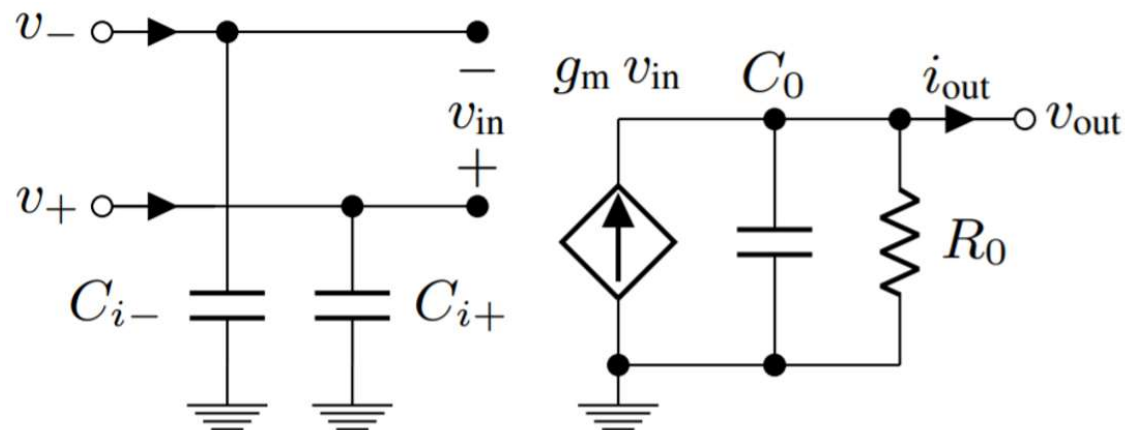


Operacioni transkonduktanski pojačavač

Karakteristike realnog OTA

- Ofset napon, ofset struje, struje polarizacije (parametri jednosmerne struje koji se definišu kao kod standardnog operacionog pojačavača).
- Konačna vrednost ulazne otpornosti R_{ul} .
- Konačna vrednost izlazne otpornosti R_{iz} .
- Konačna vrednost faktora potiskivanja CMRR.
- Konačna širina propusnog opsega (kao kod standardnog 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

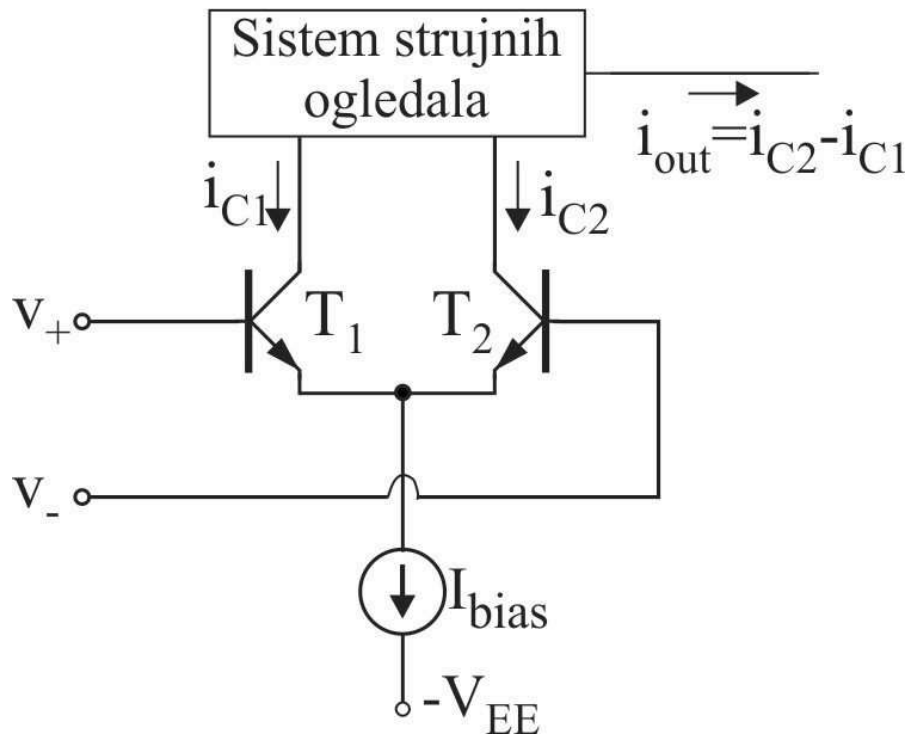
▪ Karakteristike realnog OTA

<i>Characteristics at T = 25 °C, V_{cc} = ± 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

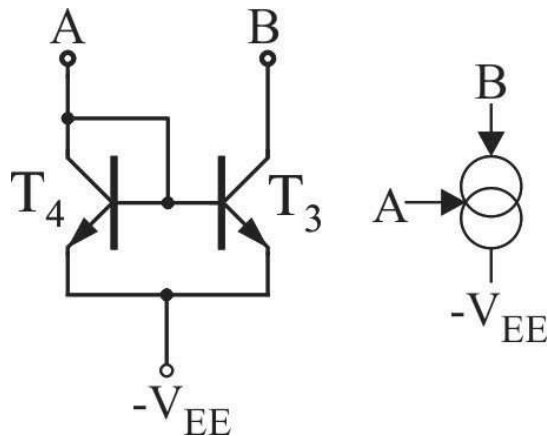
- Bipolarni OTA
 - Pojedinačne komponente: LM3080, CA3080
 - Dvostruki OTA unutar istog čipa: LM13600, CA3280
 - Tri OTA unutar istog čipa: CA3060
 - OTA sa unapređenim performansama koje su dobijene uvođenjem bafera i dioda za linearizaciju (koriste se za povećanje dinamičkog opsega): LM13600, LM13700, NE5517.

Struktura OTA

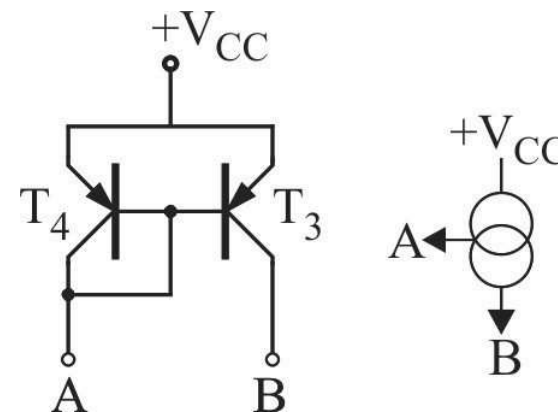


Ulazni stepen transkonduktansnog operacionog pojačavača je diferencijalni pojačavač. Sistem strujnih ogledala ima funkciju da prenese razliku struja tranzistora u diferencijalnom paru na izlaz kola i obezbedi veliku vrednost izlazne impedanse. Zahvaljujući velikoj izlaznoj impedansi izlazna sruja je nezavisna od otpornosti potrošača.

Sistem strujnih ogledala sadrži dva tipa strujnih ogledala (current source and current sink)

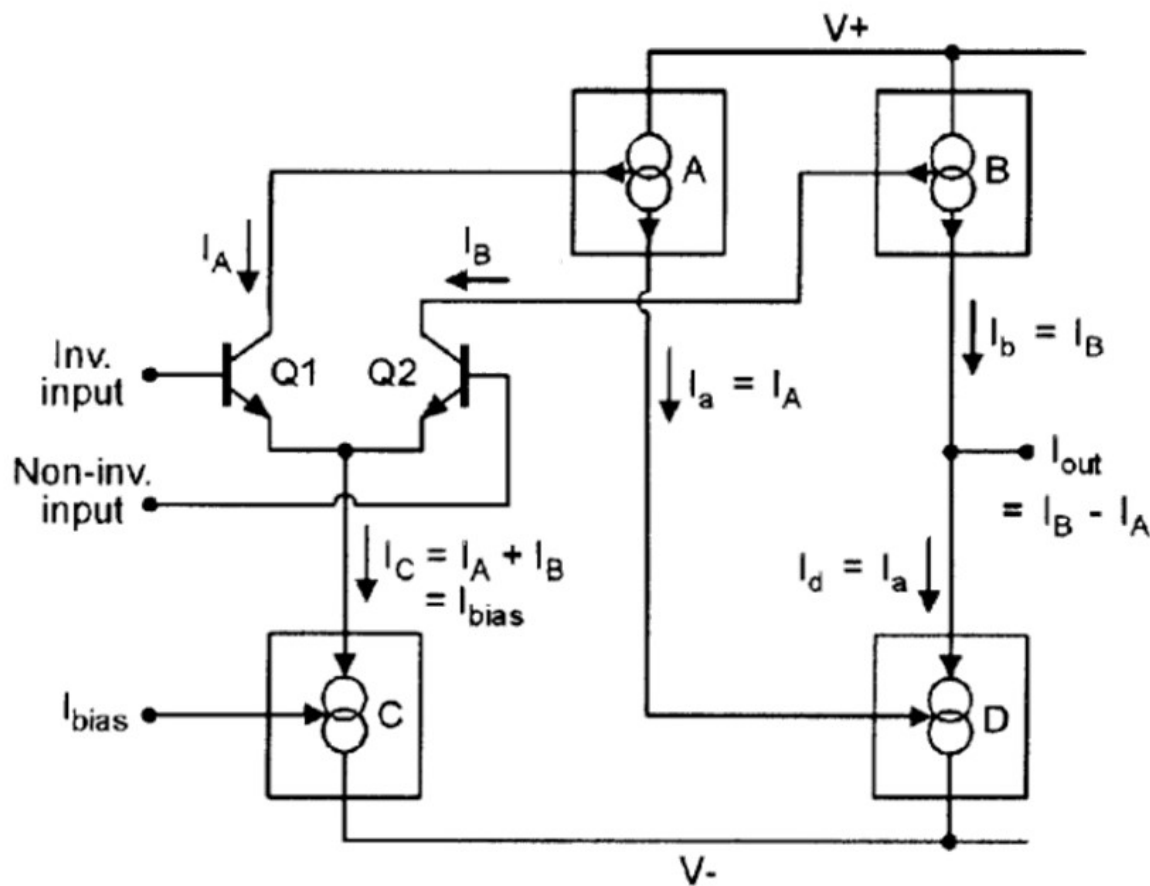


Simbol strujnog ogledala koje je strujni izvor (current source)



Simbol strujnog ogledala koje je strujni odvod (current sink)

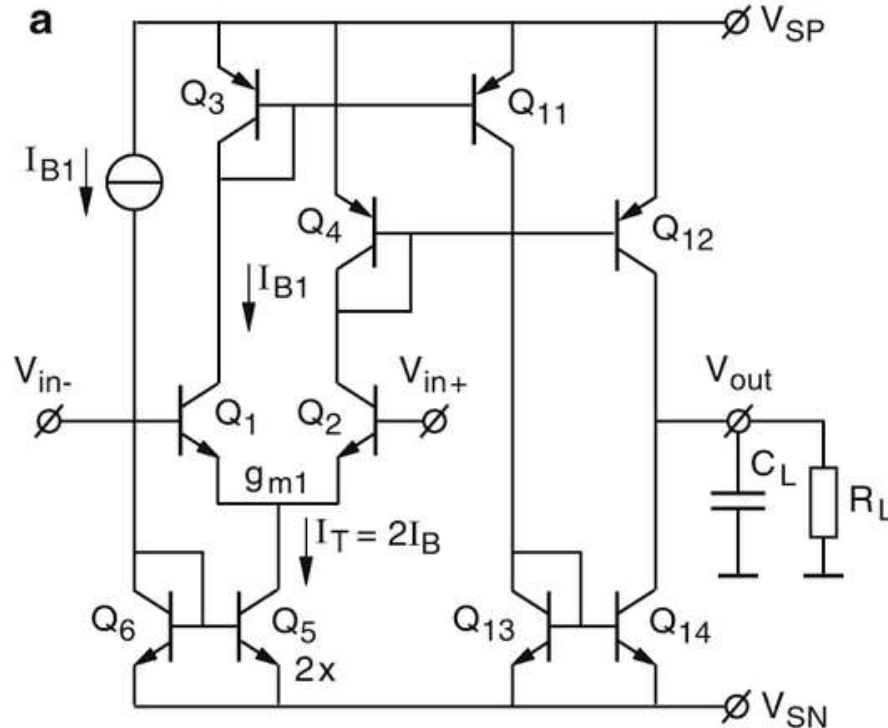
Struktura OTA



Slika prikazuje principijelnu šemu OTA. Ulazni stepen je diferencijalni pojačavač koji čine tranzistori Q_1 i Q_2 kao i izvor konstantne struje C . Pored diferencijalnog pojačavača kolo sadrži i strujna ogledala A , B i D .

Struja koju daje izvor konstantne struje C podešava se preko priključka za struju polarizacije, I_{bias} .

Struktura OTA



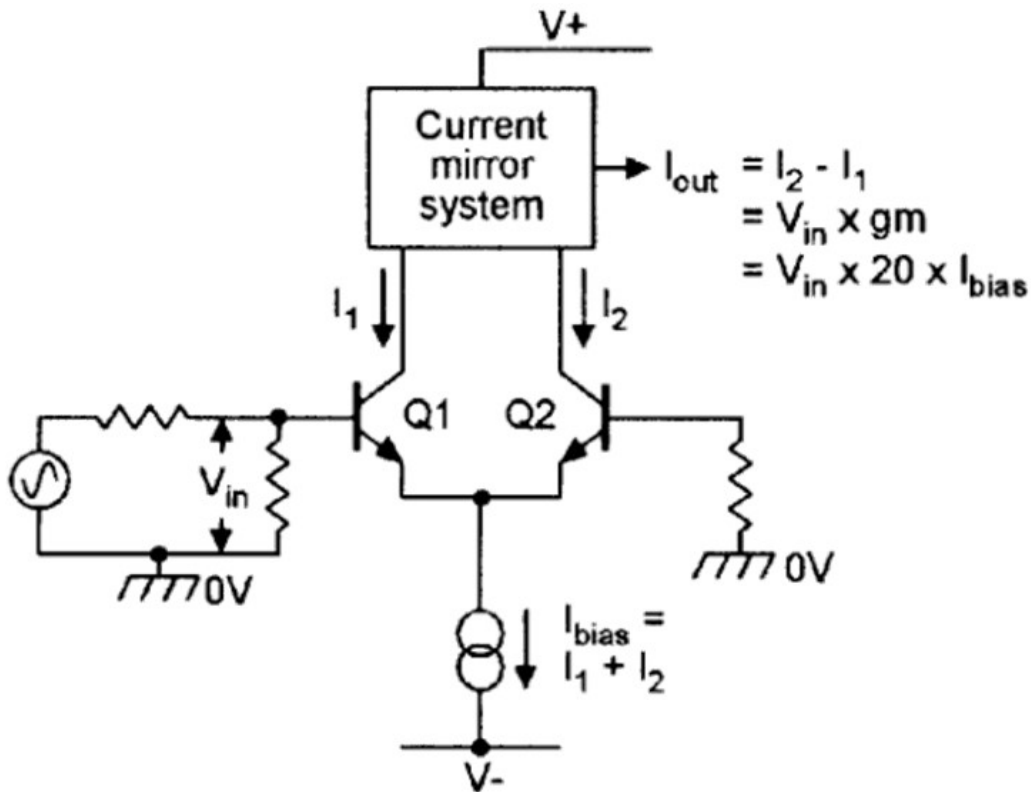
**Pojednostavljena šema
OTA na nivou tranzistora.**

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



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

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

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

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

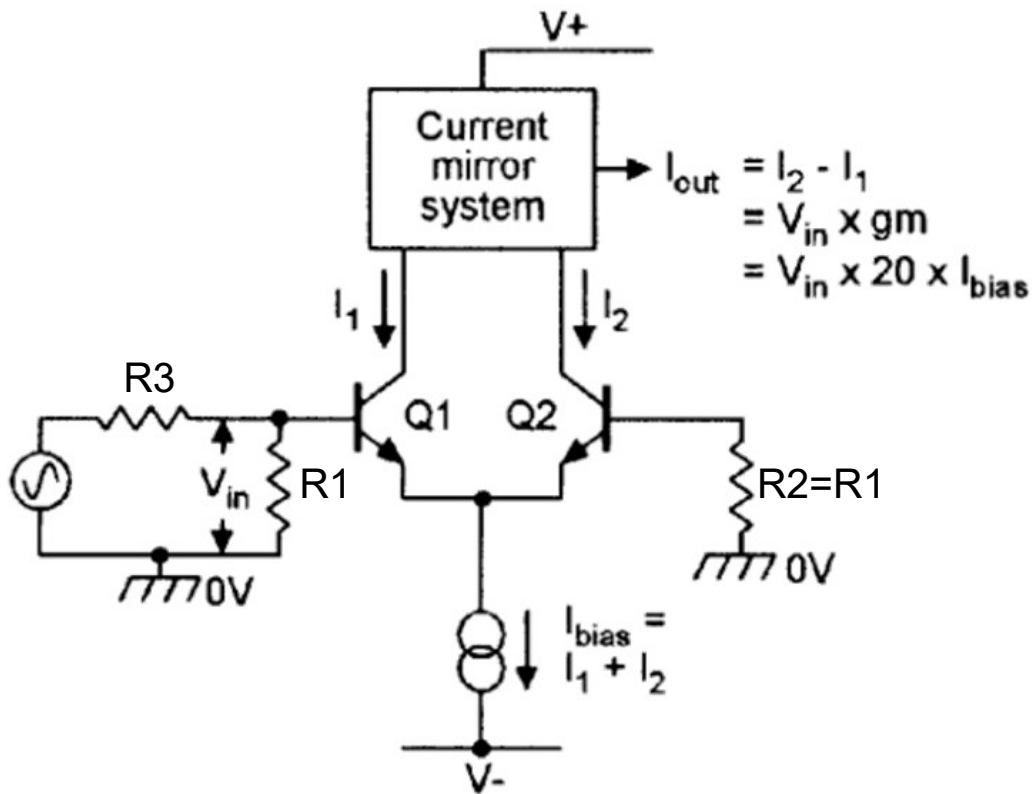
$$v_{IN} = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{i_{C1} - i_{C2}}{i_{C2}} \right)$$

Razvojem u Taylorov 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



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

Ukoliko pretpostavimo da je naizmenična komponenta struja tranzistora u diferencijalnom pojačavaču mnogo manja od jednosmerne struje.

$$i_{c2} \approx I_{c2} \approx \frac{I_{bias}}{2}$$

$$v_{IN} \approx V_T \cdot \frac{i_{c1} - i_{c2}}{i_{c2}} \approx 2 \cdot V_T \cdot \frac{i_{c1} - i_{c2}}{I_{bias}}$$

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

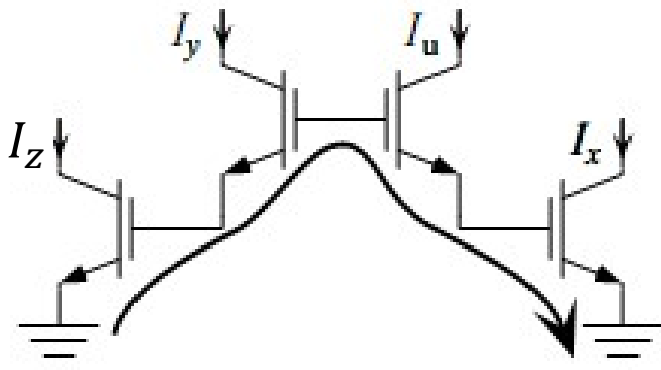
$$g_m = \frac{I_{bias}}{2 \cdot V_T} \approx I_{bias} \cdot 20V^{-1}$$

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

Primena dioda za linearizaciju

Translinearni princip

Translinearni princip je primenjiv na konture kola koje sadrži isključivo **translinearne elemente** (komponente sa eksponencijalnom zavisnošću struje od napona – diode ili bipolarni tranzistori). Translinearni elementi u konturi se mogu podeliti u dve grupe, grupu elemenata čija orjentacija napona odgovara smeru kazaljke na satu i drugu grupu čiji su naponi orjentisani u suprotnom smeru. Prema translinearnom principu proizvod struja elementa čiji su naponi orjentisane u smeru kazaljke na satu (CW) jednak je proizvodu struja elemenata konture čiji su naponi orjentisani u smeru suprotnom od kazaljke na satu (CCW). Da bi translinearni princip važio neophodno je da tranzistori čiji emitorski spojevi sačinjavaju konturu budu međusobno upareni, odnosno da imaju iste karakteristike.

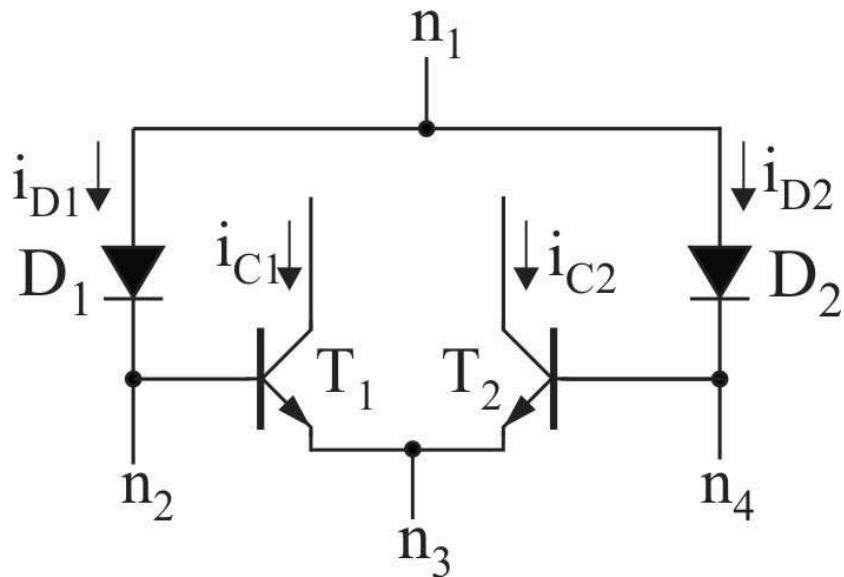


$$\prod_{k \in CW} i_k = \prod_{j \in CCW} i_j$$

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

Primena dioda za linearizaciju

- Slika prikazuje primenu translinearnog principa u transkonduktansnom operacionom pojačavaču sa diodama za linearizaciju (D1 i D2).



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

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

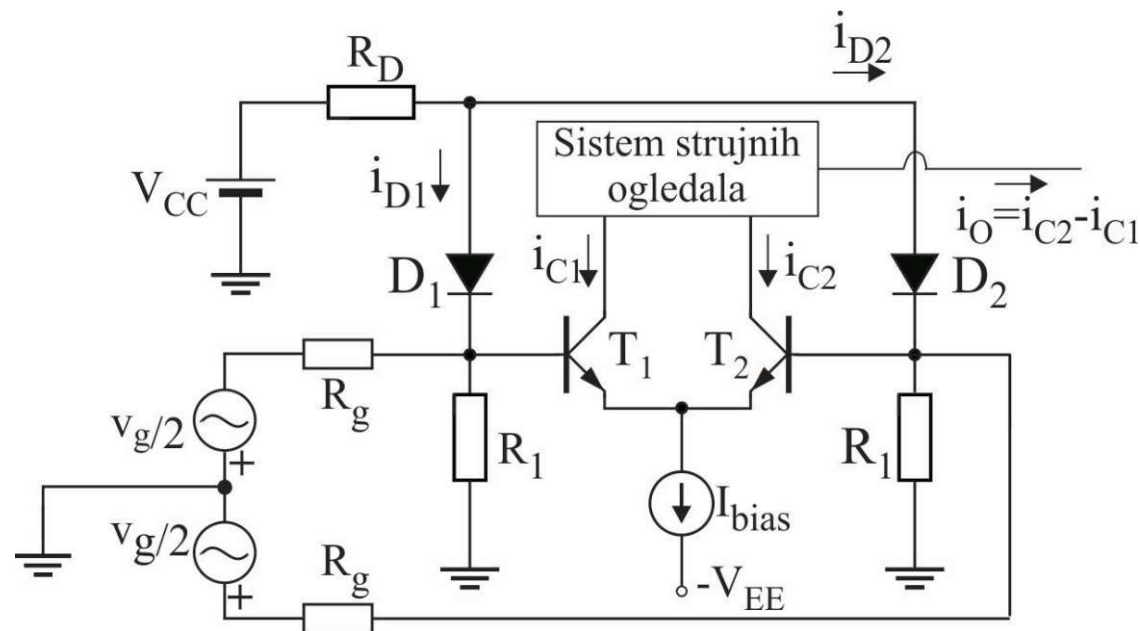
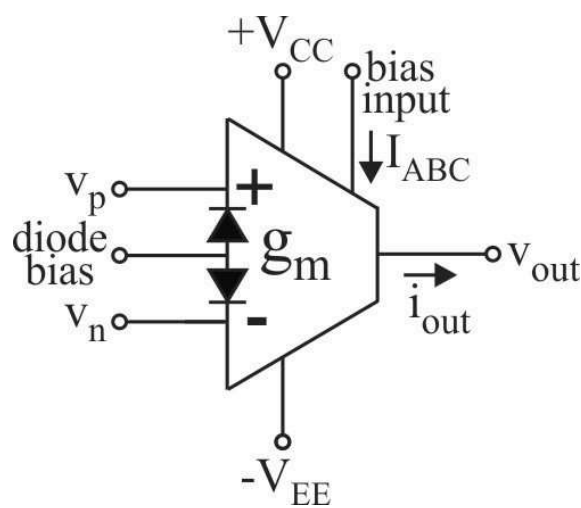
$$V_T \cdot \ln\left(\frac{i_{D1} i_{C1}}{I_S I_{ES}}\right) = V_T \cdot \ln\left(\frac{i_{D2} i_{C2}}{I_S I_{ES}}\right)$$

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

- Izraz koji povezuje struje kroz diode i struje kolektora tranzistora u diferencijalnom paru proizilazi iz translinearnog principa.

Primena dioda za linearizaciju

- U novijim integrisanim kolima transkonduktansnih operacionih pojačavača ugrađene su dve diode čija je funkcija proširenje dinamičkog opsega OTA. U ovim integrisanim kolima postoji poseban pin preko koga se dovodi struja za polarizaciju dioda. Kolo može da funkcioniše i bez dioda ukoliko se pin za polarizaciju dioda ostavi otvorenim.
- Preko dioda za linearizaciju se promene ulazne struje konvertuju po logaritamskoj funkciji u promene napona na diodama. Ove promene napona na diodama prouzrokuju promene napona na emitorskim spojevima bipolarnih tranzistora (pošto su dve diode i bipolarni tranzistori diferencijalnog para vezani u konturi). Na kraju se promene napona v_{BE1} i v_{BE} konvertuju po eksponencijalnoj funkciji u promene struje.



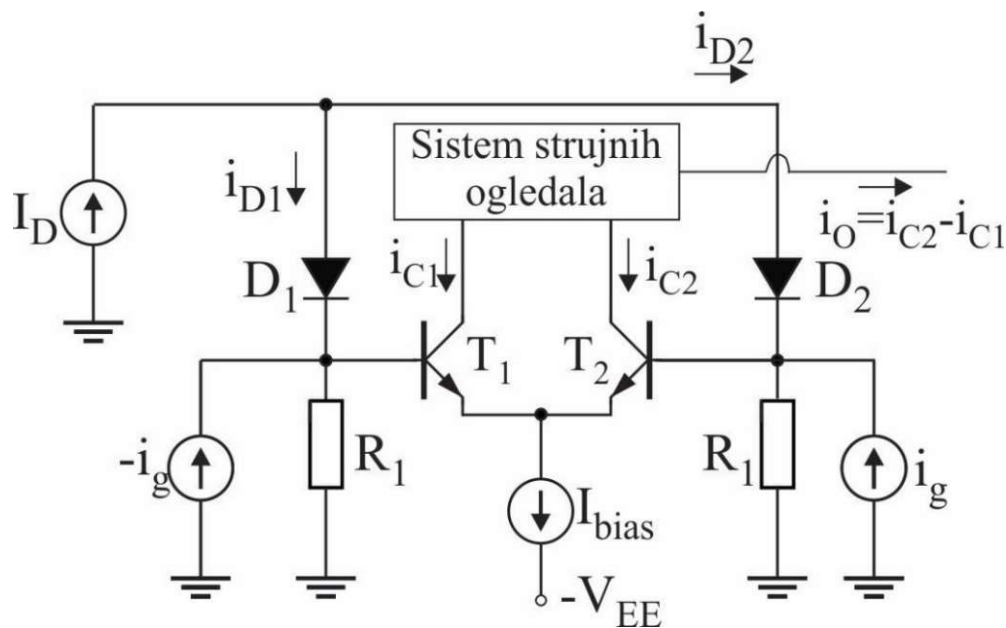
Primena dioda za linearizaciju

Prilikom realizacije OTA sa diodama za linearizaciju, usvajaju se veće vrednosti za otpornosti R_D i R_g . Sa ovako usvojenim vrednostima za otpornosti moguće je konvertovati rednu vezu V_{CC} i R_D u strujni generator I_D kao i rednu vezu V_g i R_g u strujni generator i_g . U jednosmernom režimu deluje samo generator I_D . Jednosmerne struje kroz diode možemo odrediti iz jednačine čvora koji povezuje anode dioda

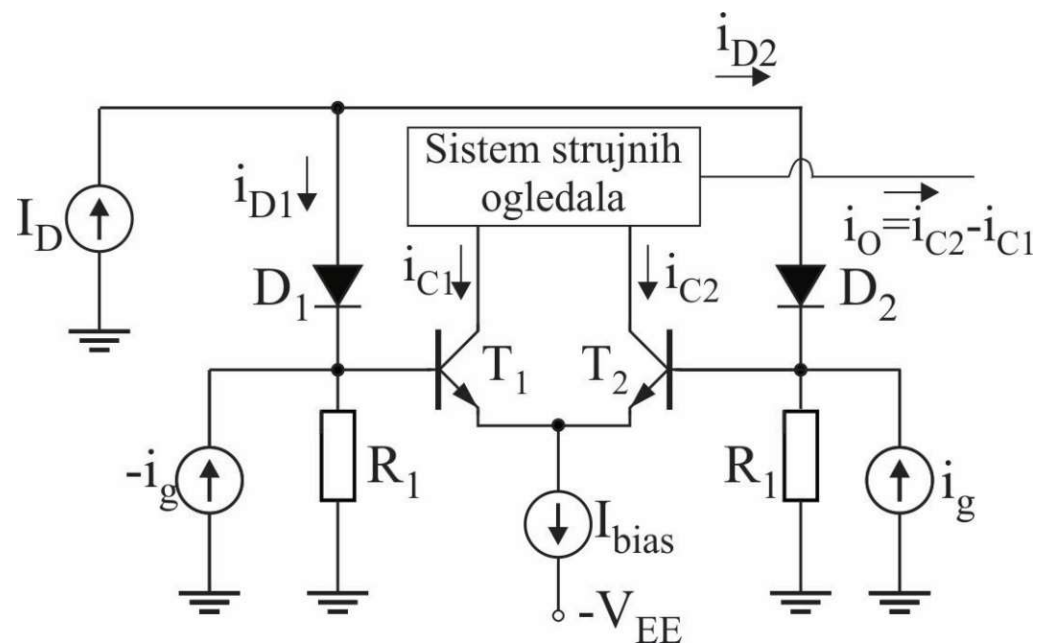
$$I_{D1} + I_{D2} = I_D$$

i činjenice da je kolo simetrično, odakle sledi:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_D}{2}$$



Primena dioda za linearizaciju



Kada se razmatra naizmenični režim rada, pretpostavlja se da je pobuda asimetrična, odnosno da su strujne pobude jednake po amplitudi a suprotne po fazi. Odavde sledi da za naizmeničnu struju kroz diode važi

$$i_{d1} = -i_g \quad i_{d2} = i_g$$

Ukupna struja kroz diode biće

$$i_{D1} = I_{D1} + i_{d1} = \frac{I_D}{2} - i_g$$

$$i_{D2} = I_{D2} + i_{d2} = \frac{I_D}{2} + i_g$$

Jednosmerne struje kolektora tranzistora u diferencijalnom paru se mogu izraziti kao:

$$I_{C1} = \frac{I_{bias}}{2} \quad I_{C2} = \frac{I_{bias}}{2}$$

Za naizmeničnu struju kolektora važi

$$i_{out} = i_{c2} - i_{c1} \quad i_{c1} = -i_{c1}$$

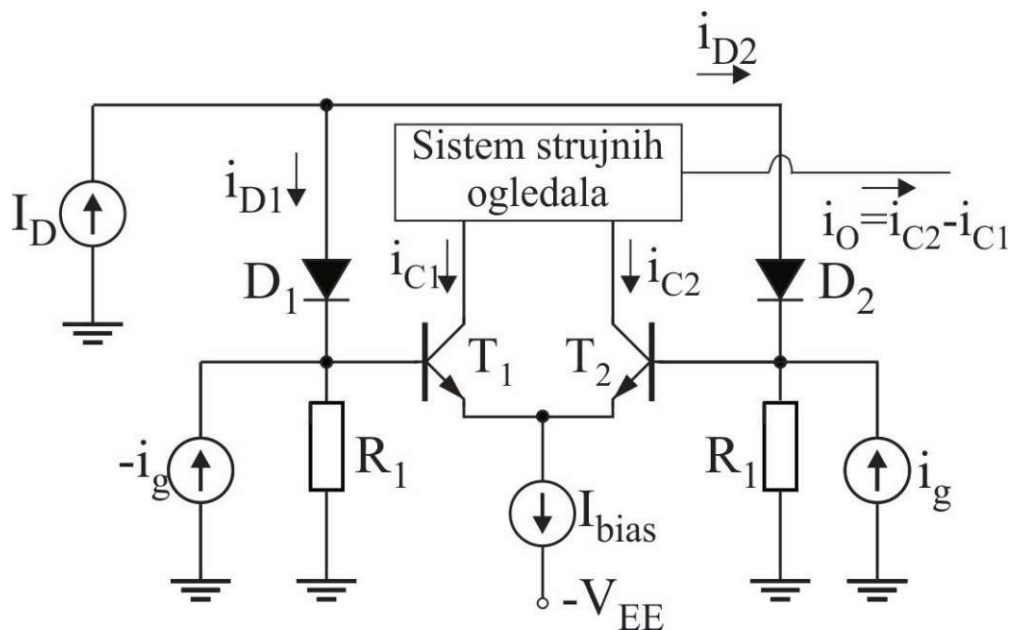
odakle sledi

$$i_{c2} = \frac{i_{out}}{2} \quad i_{c1} = -\frac{i_{out}}{2}$$

Ukupne struje kolektora tranzistora u diferencijalnom paru su:

$$i_{C1} = I_{C1} + i_{c1} = \frac{I_{bias}}{2} - \frac{i_{out}}{2} \quad i_{C2} = I_{C2} + i_{c2} = \frac{I_{bias}}{2} + \frac{i_{out}}{2}$$

Primena dioda za linearizaciju



Za konturu koja obuhvata pad napona na diodi D_1 , emitorskom spoju tranzistora T_1 , emitorskom spoju tranzistora T_2 i pad napona na diodi D_2 može se pisati:

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

Prema translinearnom principu za struje kroz diode i tranzistore važiće :

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

Nakon što se u gornju jednačinu zamene izrazi za struje kroz diode :

$$i_{D1} = \frac{I_D}{2} + i_g \quad i_{D2} = \frac{I_D}{2} - i_g$$

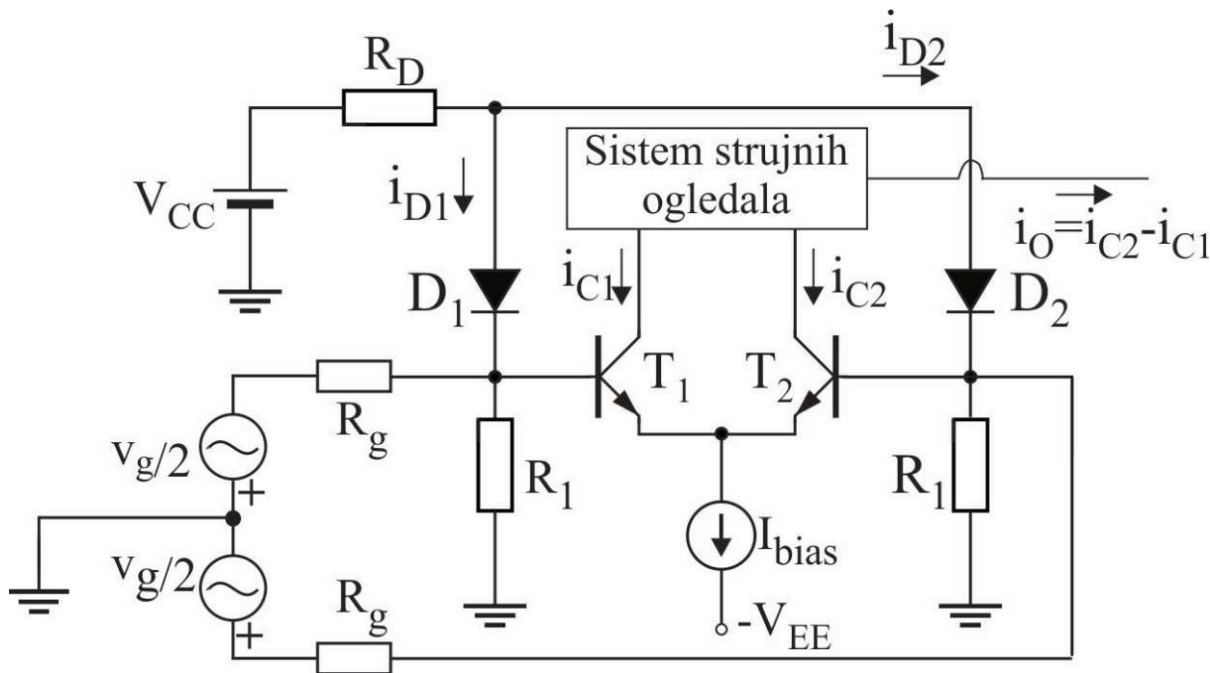
i izrazi za struje kolektora u funkciji izlazne struje:

$$i_{C1} = \frac{I_{bias}}{2} - \frac{i_{out}}{2} \quad i_{C2} = \frac{I_{bias}}{2} + \frac{i_{out}}{2}$$

dobija se izraz za izlaznu struju:

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

Primena dioda za linearizaciju



Zamenom $i_g = \frac{v_g}{2R_g}$ u izraz za izlaznu struju dobija se

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

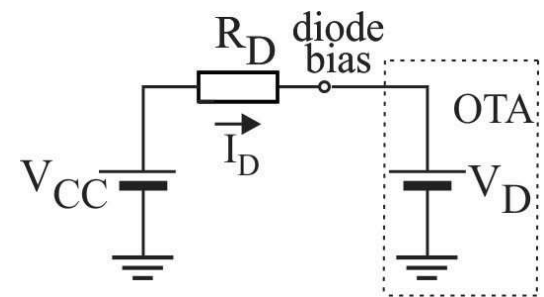
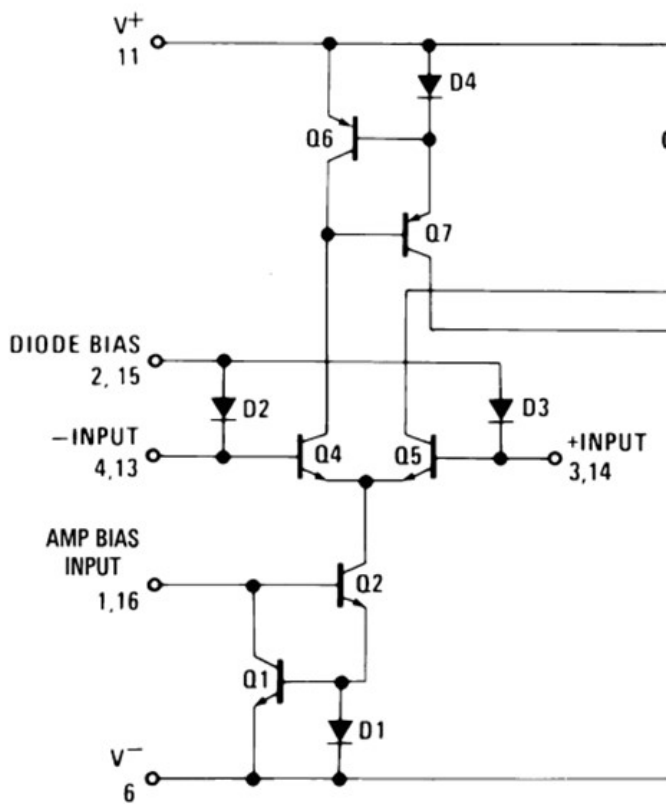
Iz gornjeg izraza sledi da je transkonduktansu OTA:

$$g_m = \frac{i_{out}}{v_g}$$

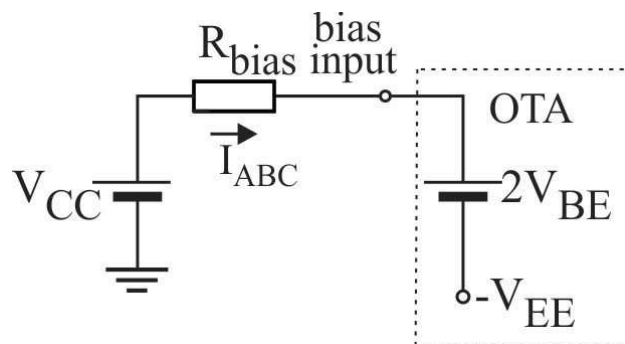
$$g_m = \frac{I_{bias}}{R_g \cdot I_D}$$

- Jednosmerna struja I_D i struja koja teče kroz strujni generator I_{bias} jednostavno se podešavaju otpornicima koji se nalaze van integrisanog kola.
- Uvođenjem dioda za linearizaciju (D_1 i D_2) značajno se povećava dinamički opseg ulaznog signala (maksimalna vrednost amplitude ulaznog napona za koju OTA linearno pojačava signal).

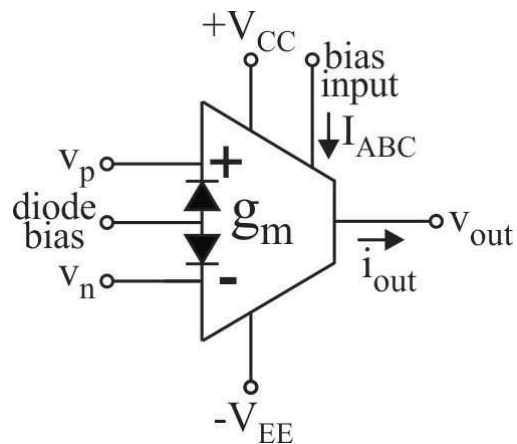
Polarizacija OTA



$$I_D = \frac{V_{CC} - V_D}{R_D}$$



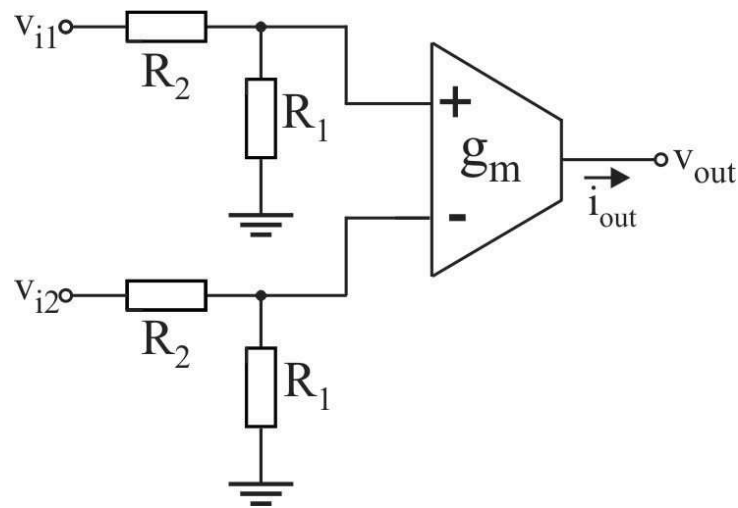
$$I_{bias} = \frac{V_{CC} - V_{bias}}{R_{bias}} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - 2V_{BE}}{R_{bias}}$$



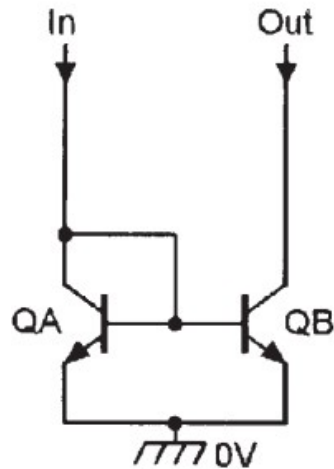
- Struja polarizacije, I_{bias} , koja odgovara struji jednosmernog izvora napajanja diferencijalnog pojačavača određena je spoljnjim komponentama, naponom polarizacije V_{CC} i otpornikom R_{bias} . Struja koja teče kroz diode I_D takođe zavisi od spoljnjih komponenata, napona polarizacije V_{CC} i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

Polarizacija OTA

- Prilikom podešavanja struje polarizacije I_{bias} i struje kroz diode I_D bitno je da se ne prekorače vrednosti struja koje su predviđene za integrisanu komponentu. Tipične vrednosti za maksimalne vrednosti struja su oko 1 mA.
- Ukoliko se OTA povezuje bez dioda za linearizaciju dinamički opseg ulaznog signala, koloD2 će raditi u linearnom režimu rada ukoliko ulazni diferencijalni napon nije veći od 25 mVpp. Da bi ovo kolo bilo primenjivo u praksi na svaki od ulaza se vezuju dva razdelnika napona čija je namena da umanje vrednost ulaznog napona na vrednost koja odgovara dozvoljenoj vrednosti dinaimčkog opsega za OTA. Tipične vrednosti za otpornik u paralelnoj grani R_1 su stotinak oma, a za otpornik u rednoj grani, R_2 sto kilooma.

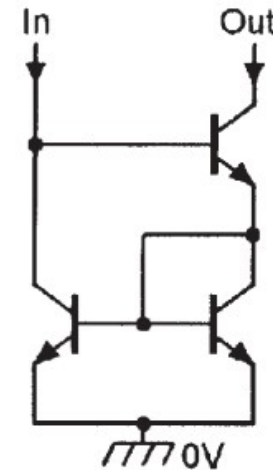


Strujna ogledala



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

$$R_{out} = r_o$$



Wilsonovo strujno ogledalo

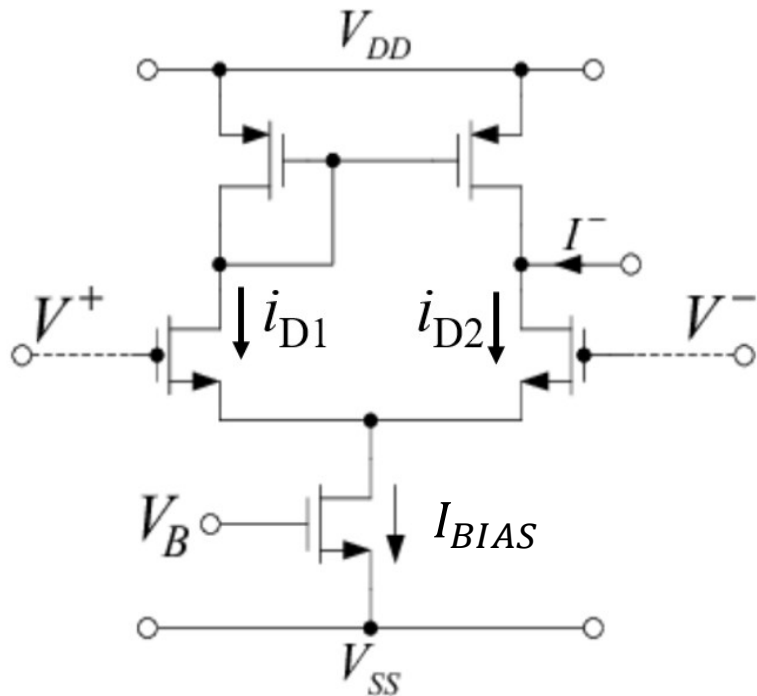
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\beta^2 + 2 \cdot \beta}{\beta^2 + 2 \cdot \beta + 2}$$

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

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

Operacioni transkonduktanski pojačavač

Jednostepeni OTA (Milerov OTA)



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

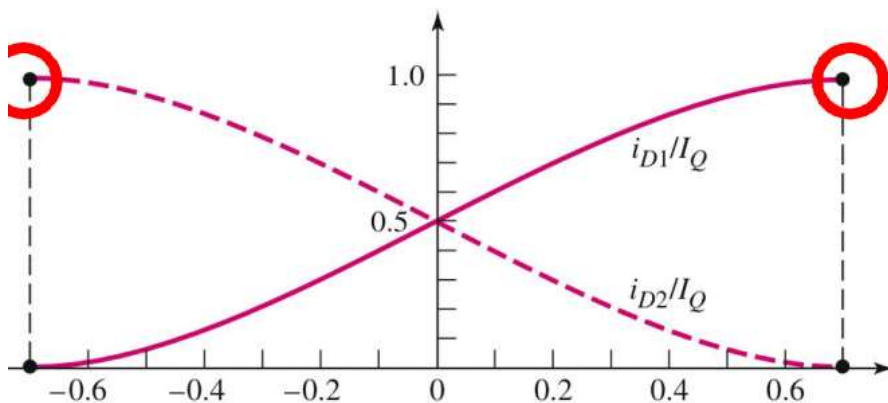
$$i_{D2} = k_n (v_{GS2} - v_{tn})^2$$

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

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

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

$$g_m(\max) = \left. \frac{di_{D1}}{dv_{in}} \right|_{V_{in} = 0} = \sqrt{\frac{k_n I_{BIAS}}{2}} = \frac{g_m(M1)}{2}$$

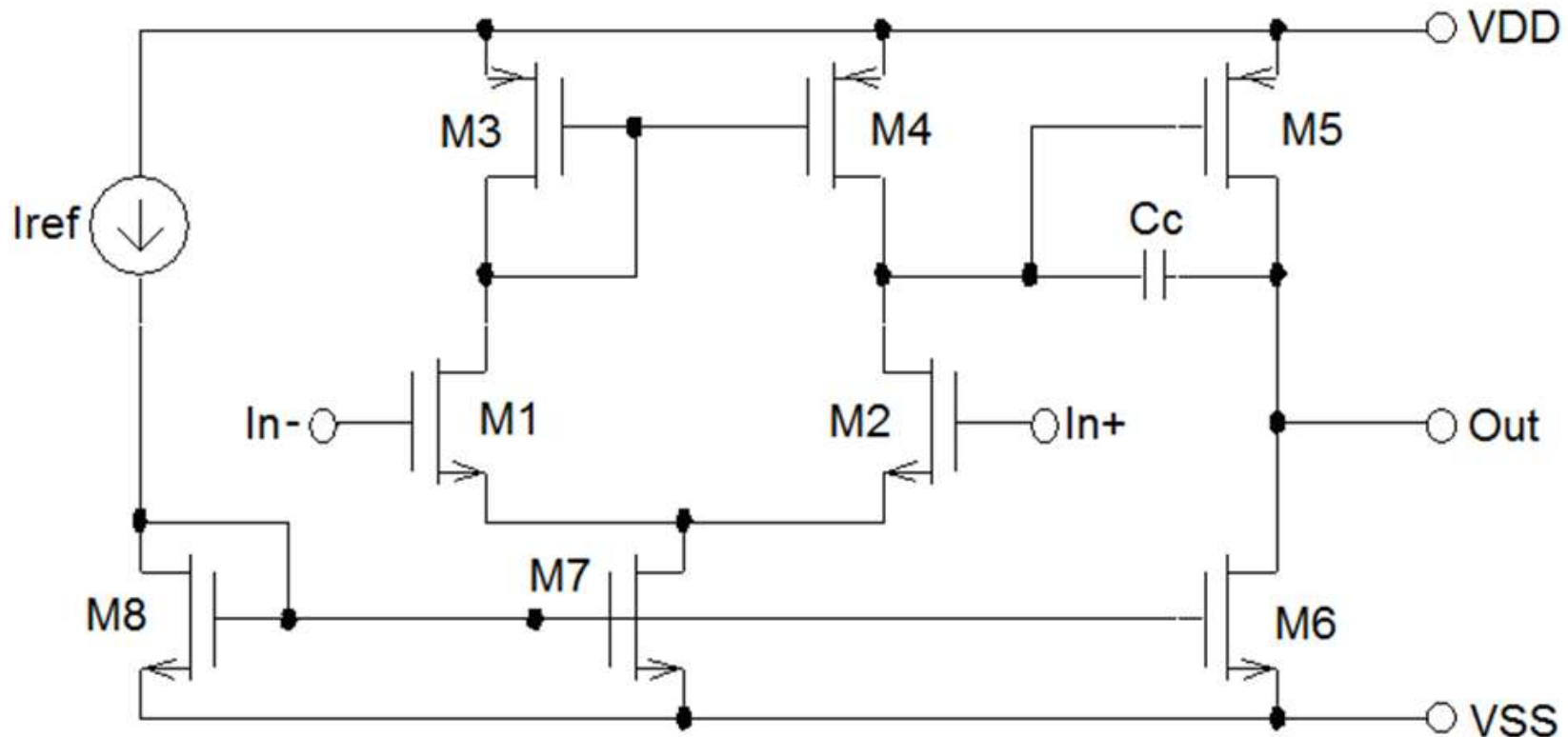


$$g_m(\max) = \sqrt{\frac{k_n I_{BIAS}}{2}}$$

DC prenosna karakteristika
MOSFET diferencijalnog para

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

Poređenje bipolarnog i MOSFET OTA

Bipolar: g_m increases linear with current

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

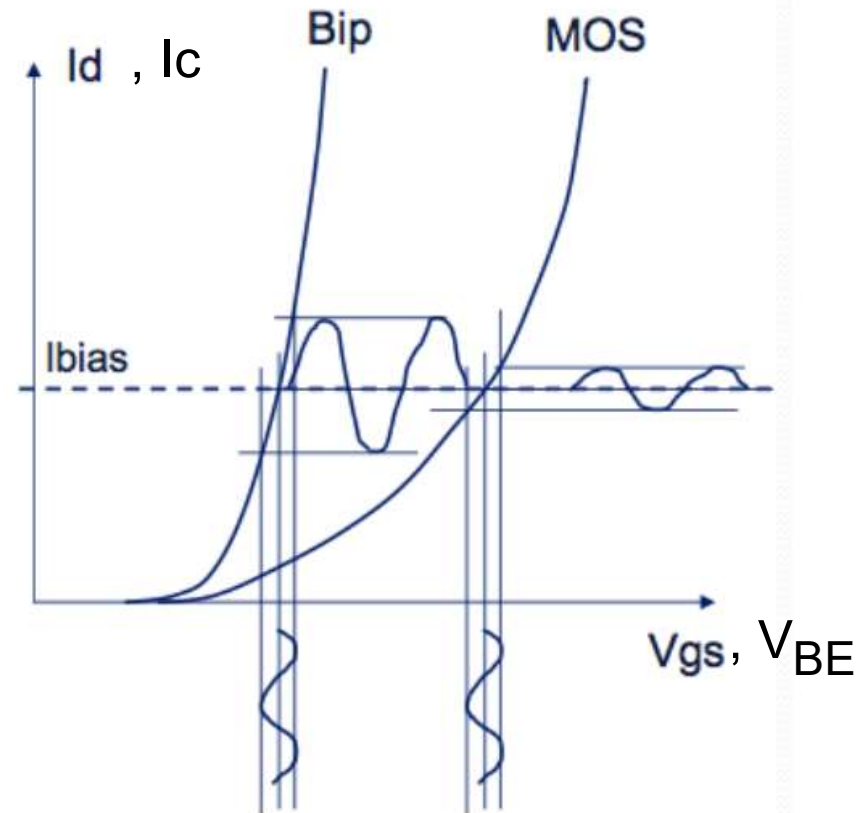
$$g_m = \frac{d I_C}{d V_{be}} = \frac{I_C}{V_t}$$

MOS: g_m increases with squareroot of current

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

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

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

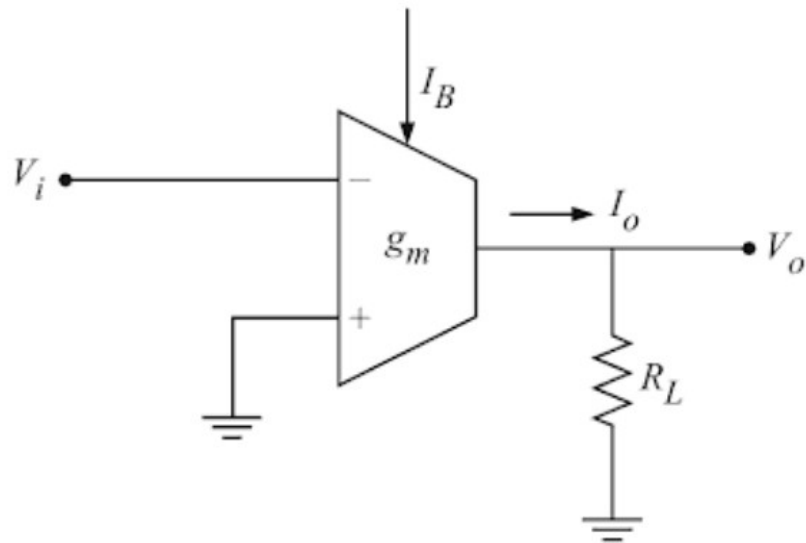


bipolar transistor will achieve more g_m

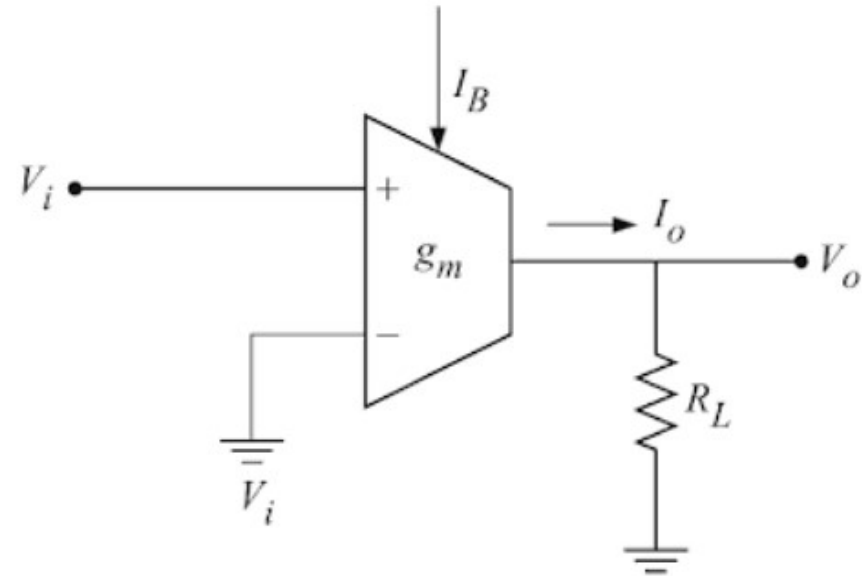
Transkonduktansa OTA je jednaka transkonduktansi tranzistora u diferencijalnom paru. Bipolarnim tranzistorima se dobija veća vrednost transkonduktanse pri istoj jednosmernoj struji jer je transkonduktansa bipolarnog tranzistora srazmerna je struji kolektora, dok je transkonduktansa MOSFET-a srazmerna kvadratnom korenu struje drejna.

Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

Invertujući i neinvertujući pojačavač realizovan sa jednim OTA



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

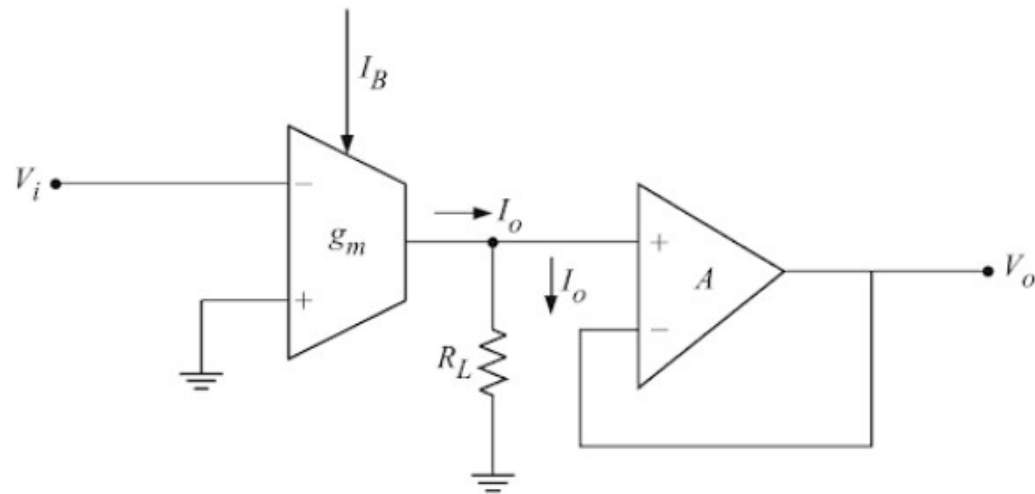


$$\frac{V_0}{V_{in}} = g_m \cdot R_L$$
$$Z_{out} = R_L$$

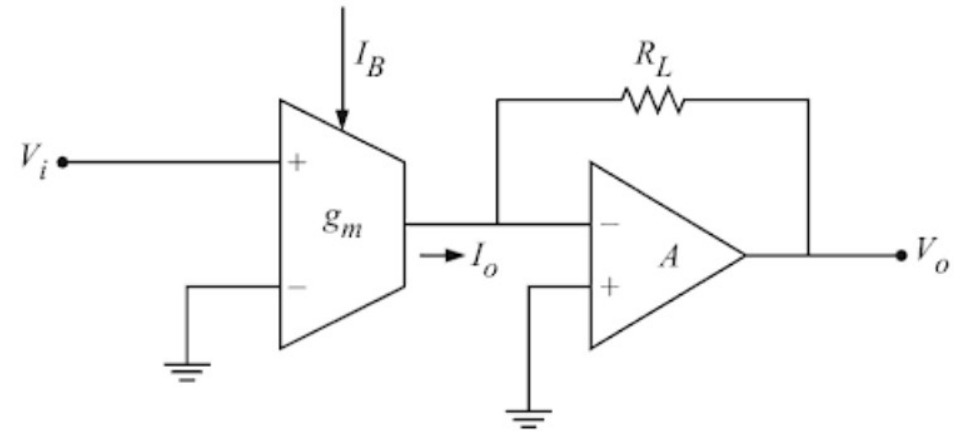
- Naponsko pojačanje se može jednostavno podešavati jer je direktno proporcionalno transkonduktansi g_m .
- Ova kola odlikuje velika izlazna otpornost.

Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

Baferski invertujući pojačavač realizovan sa jednim OTA



$$A_n = \frac{V_o}{V_{in}} = -g_m \cdot R_L$$
$$Z_{out} = 0$$

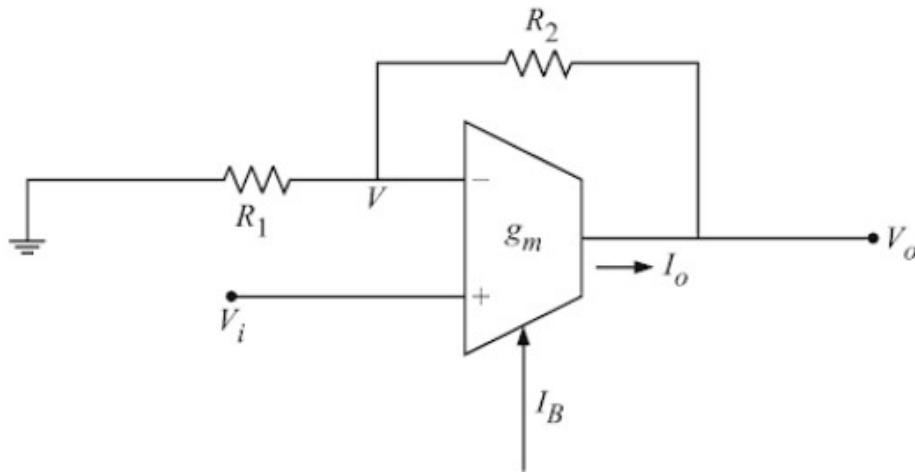


$$A_n = \frac{V_o}{V_{in}} = -g_m \cdot R_L$$
$$Z_{out} = 0$$

- Zahvaljujući baferskom stepenu koji čini operaciono pojačavač, ova kola imaju malu izlaznu otpornost. Drugi pozitivan efekat primene bafera je neutralisanje uticaja izlazne parazitne kapacitivnosti OTA.
- Granična frekvencija ovog kola je veoma velika i približno jednaka frekvenciji jediničnog pojačanja (gain bandwidth, GB) $f_{3dB} = GB$ operacionog pojačavača, nezavisno od vrednosti naponskog pojačanja kola.

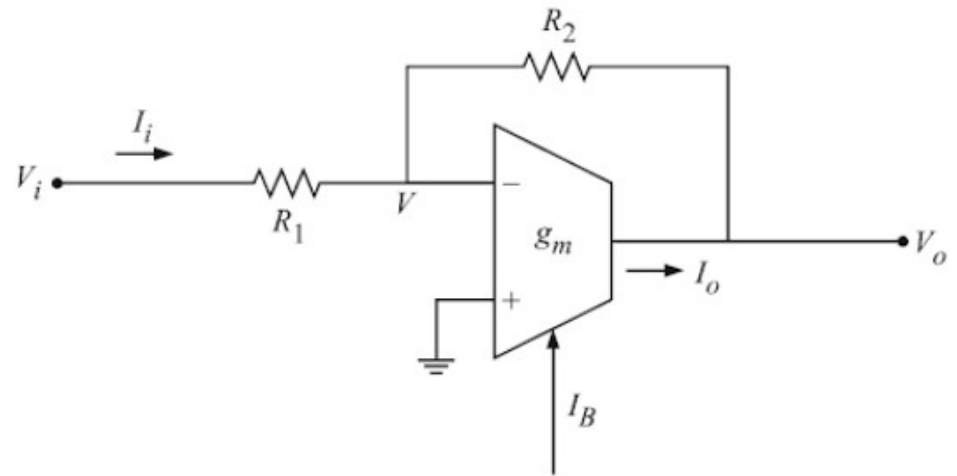
Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

Invertujući i neinvertujući pojačavač realizovani povratnom spregom



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

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



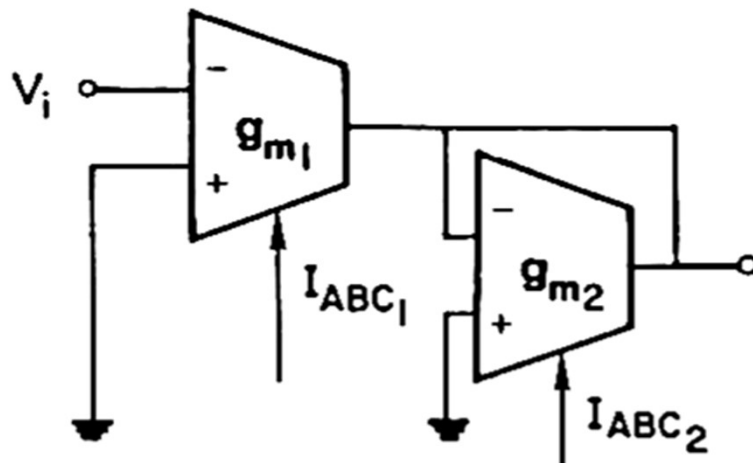
$$A_n = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1 - g_m \cdot R_2}{1 + g_m \cdot R_1}$$

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

- Postoji nelinearna zavisnost pojačanja od transkonduktanse g_m čime je otežano podešvanje pojačanja
- Invertujućim pojačavačem se može dobiti i pozitivno i negativno pojačanje za određene vrednosti transkonduktanse g_m .
- Ukoliko se promene ulazni priključci OTA, promeniće se znak uz transkonduktansu u izrazima. Za tako realizovana kola mogu se dobiti velike vrednosti pojačanja kada je $g_m = \frac{1}{R_1}$.

Invertujući pojačavač realizovan sa dva OTA

Kolo ne sadrži pasivne komponente. Oba transkonduktanska operaciona pojačavača se mogu realizovati na istom čipu. U tom slučaju bi varijacije transkonduktansi sa promenom temperature bile približno iste, iz čega sledi da bi naponsko pojačanje kola bilo temperaturnski stabilno. Ovim kolom se naponsko pojačanje i izlazna otpornost mogu nezavisno podešavati, naponsko pojačanje promenom g_{m1} a izlazna otpornost promenom g_{m2} .



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

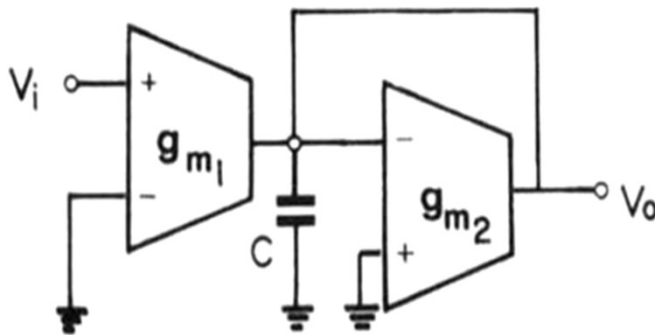
$$R_0 = \frac{1}{g_{m2}}$$

Aktivni filtari realizovan primenom OTA

- Prednosti aktivnih filtara realizovanih primenom transkonduktansnih operacionih pojačavača u odnosu na aktivne filtre realizovani standardnim operacionim pojačavačima:
 - Omogućavaju filtriranje signala na znatno višim frekvencijama.
 - Pružaju mogućnost podešavanja graničnih frekvencija filtara unutar nekoliko dekada. Podešavanja graničnih frekvencija se obavljaju promenom transkonduktanse g_m na taj način što se menja struja polarizacije OTA. Prilikom izbora topologije kola nastoji se da svi bitni parametri filtra budu linearno zavisni od transkonduktanse g_m .
 - Mogu se realizovati sa manjim brojem pasivnih elemenata.
- Nedostaci aktivnih filtara realizovani primenom OTA:
 - Transkonduktansi pojačavač ima mali dinamički opseg ulaznog signala koji, ukoliko nema dioda za linearizaciju, iznosi oko 30 mV.
 - Velika izlazna otpornost čini filtre osetljivimi na vrednost opterećenja. Ovaj problem se najčešće rešava prinom naponskog bafera na izlazu filtra.

Aktivni filter realizovan primenom OTA

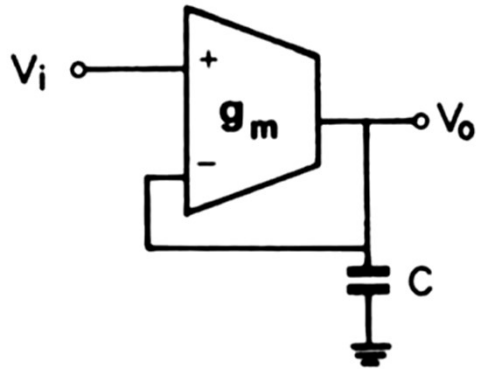
- Primenom OTA može se realizovati veliki broj različitih konfiguracija aktivnih filtara. Kod ovih filtara je moguće podešavati pojačanje, kritične frekvencije ili istovremeno oba ova parametra. Postoji čak i mogućnost da se promeni tip filtra kontinualnom promenom transkonduktanse.
- U filterskoj sekciji prvog reda OTA označen sa G_{m2} povezan je na takav način da pretstavlja otpornik kontrolisan naponom, $R=1/g_{m2}$. NF filterska sekcija čija se granična frekvencija, ω_{3dB} , i jednosmerno pojačanje, A_o , mogu podešavati promenom transkonduktansi g_{m1} i g_{m2} .



$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{m2} + sC}$$
$$\omega_{3dB} = \frac{g_{m2}}{C} \quad A_o = \frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

Primene operacionih transkonduktansnih pojačavača

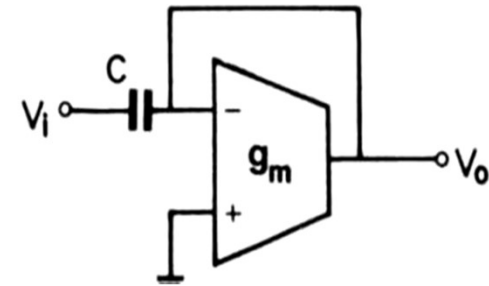
Filtarske sekcije prvog reda



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

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

Propusnik niskih frekvencija čija je granična frekvencija direktno srazmerna transkonduktansi g_m . Ovo je adaptivni filter čija se granična frekvencija može menjati linearno sa promenom struje polarizacije OTA. Pri promeni granične frekvencije jednosmerno pojačanje ostaje konstantno.

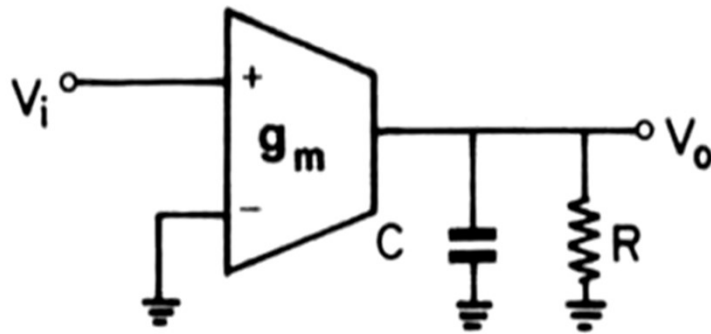


$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{sC}{sC + g_m}$$

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

Propusnik visokih frekvencija čija je granična frekvencija direktno srazmerna transkonduktansi g_m . Ovo je adaptivni filter čija se granična frekvencija linearno menja sa promenom transkonduktanse (ili struje polarizacije OTA). Nominalno pojačanje kola pri promeni granične frekvencije ostane konstantno.

Filtarske sekcije prvog reda



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

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

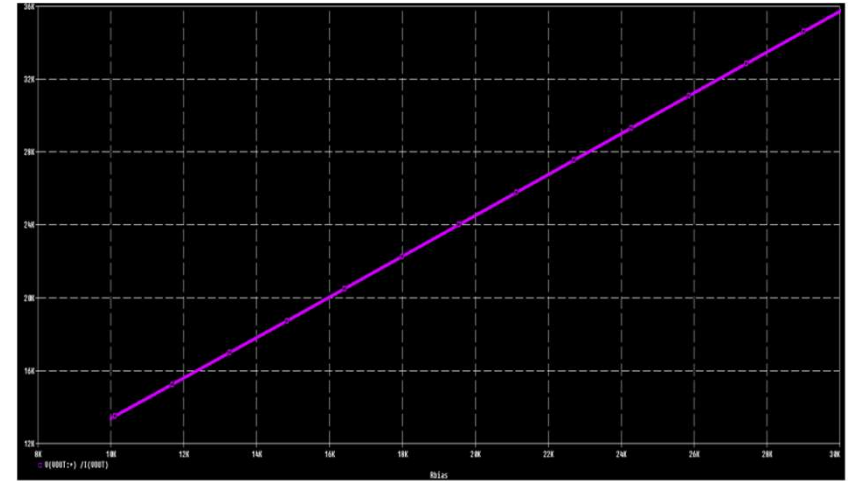
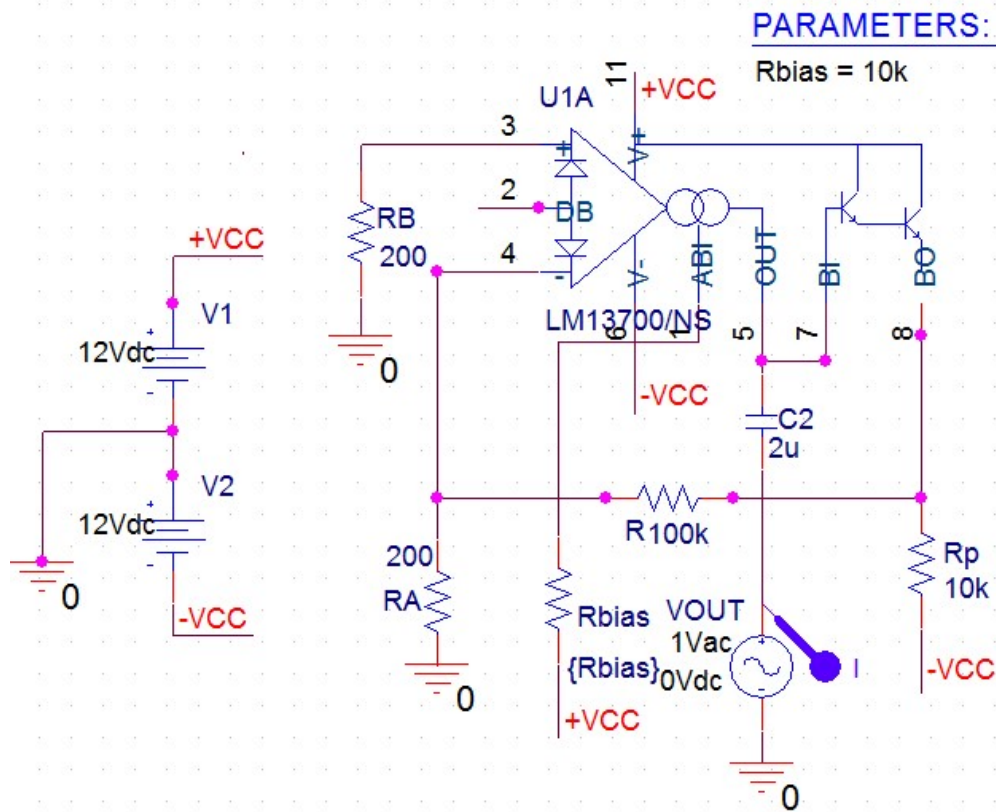
$$\omega_{3dB} = \frac{1}{C \cdot R}$$

$$A_o = g_m \cdot R$$

Najznačajnije primene OTA:

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

Promenjliva dinamička otpornost realizovana primenom OTA

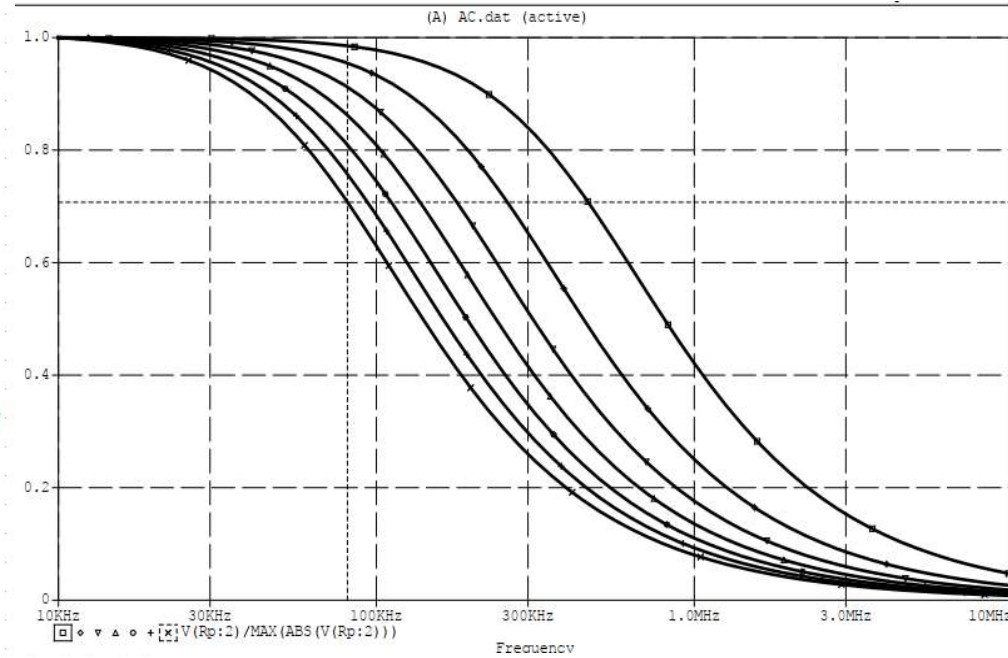
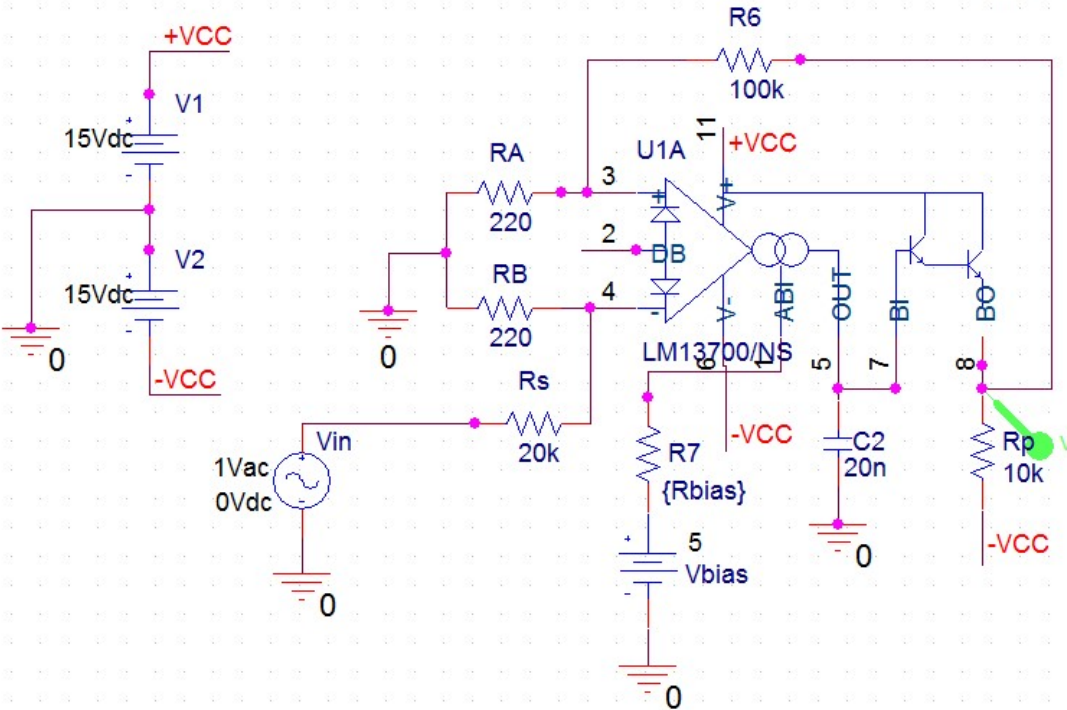


$$R_X = \frac{R + R_A}{g_m \cdot R_A}$$

Naponom kontrolisani aktivni filter primenom OTA

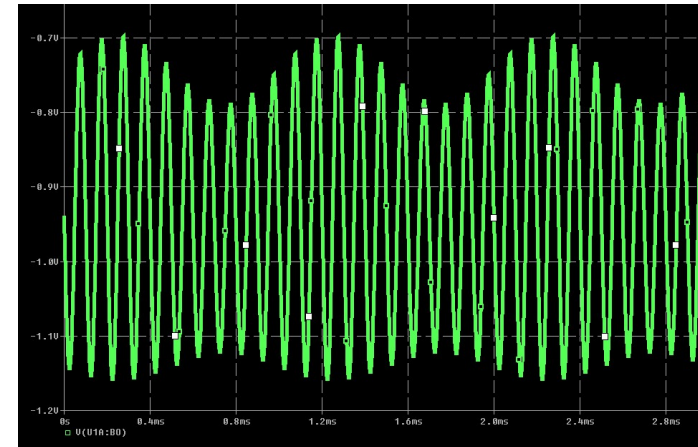
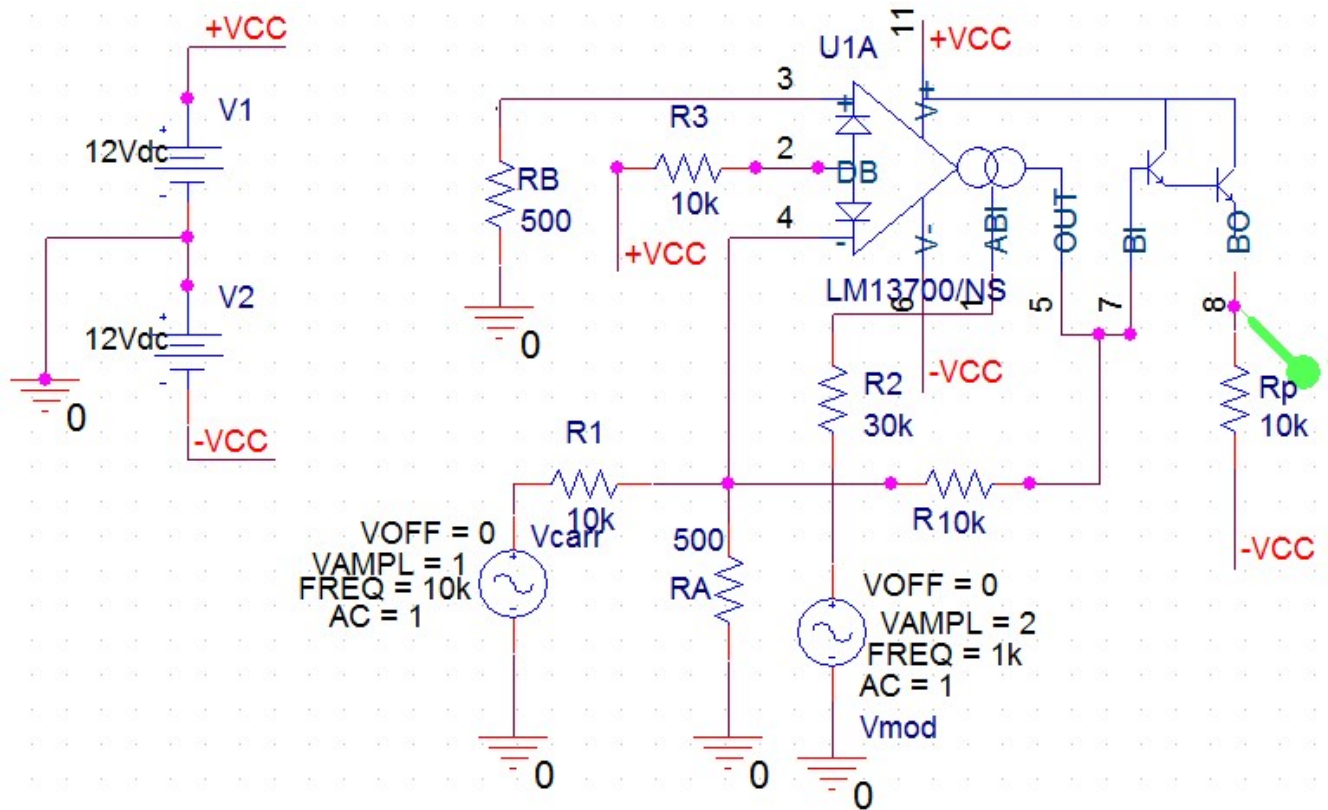
PARAMETERS:

Rbias = 10k

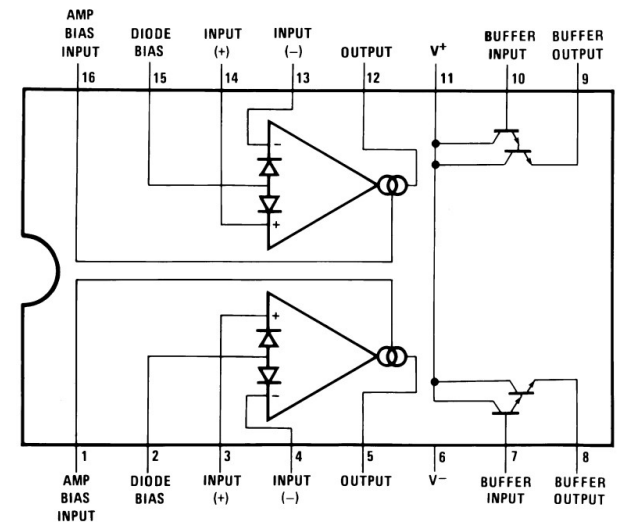
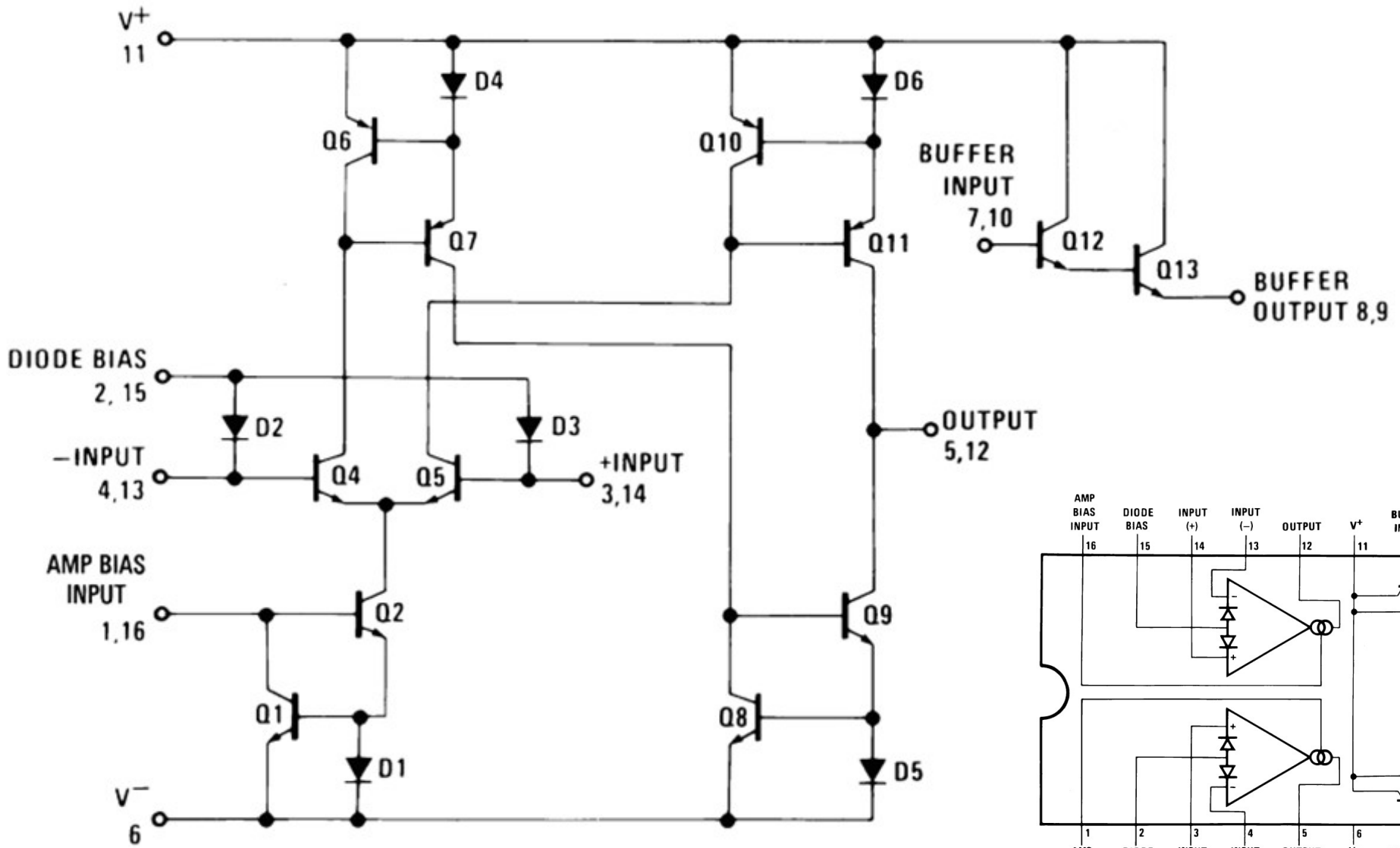


$$f_o = \frac{R_A \cdot g_m}{2 \cdot \pi \cdot (R_A + R) \cdot C}$$

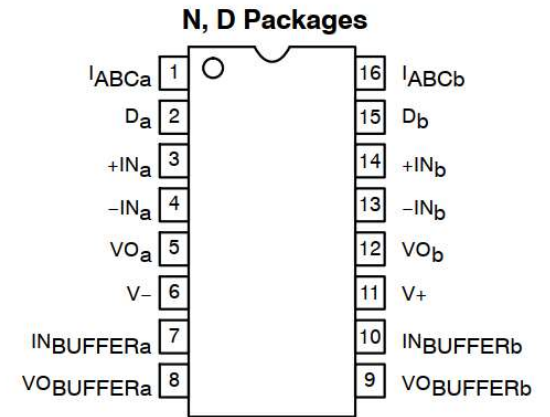
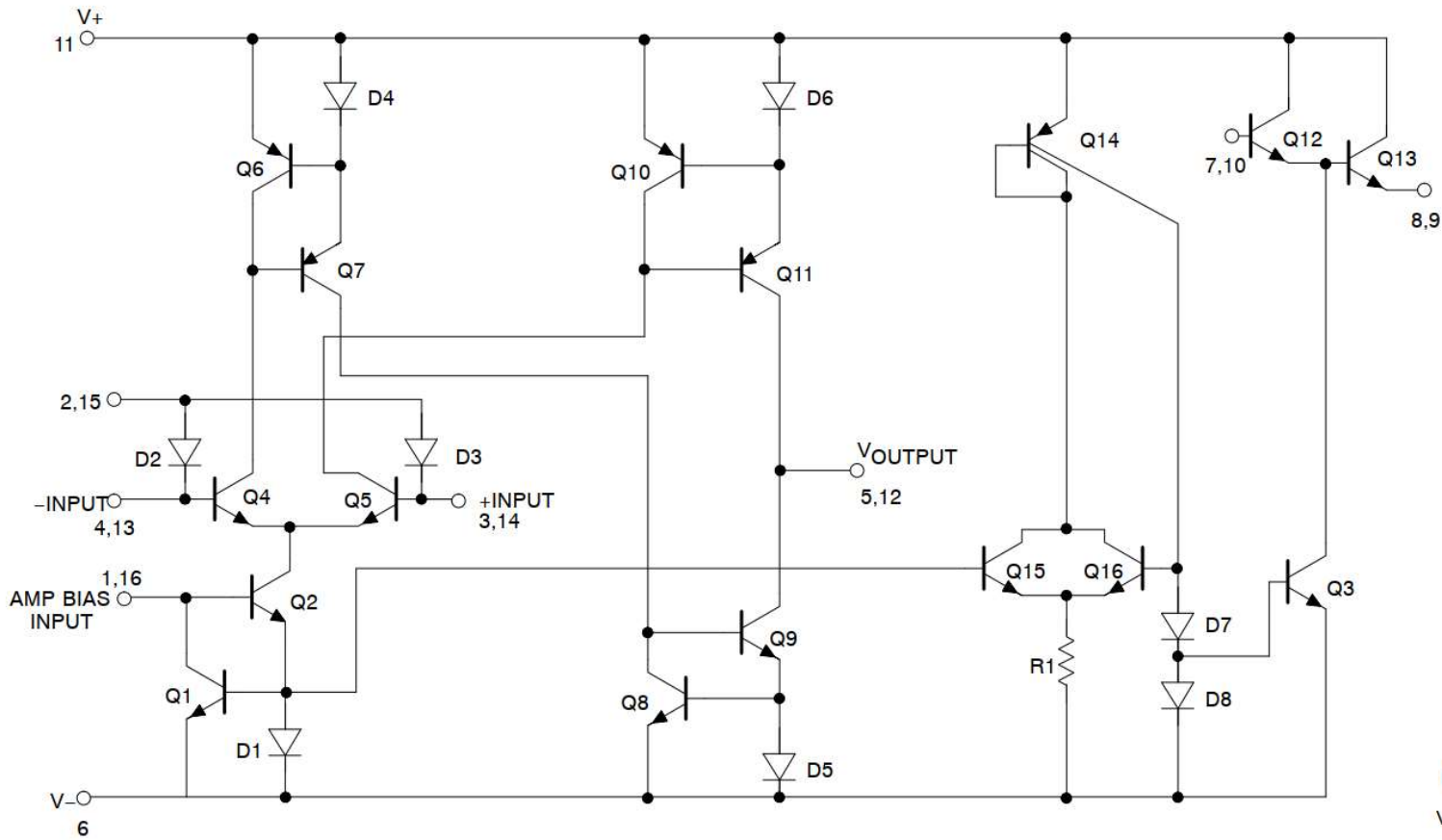
Amplitudska modulacija primenom OTA



LM13700



NE 5517



Transkonduktanski operacioni pojačavač - OTA

Osnovna pitanja

1. Model idealnog OTA, karakteristike idealnog OTA, razlike između OTA i standardnog operacionog pojačavača (3,4).
2. Struktura transkonduktanskog operacionog pojačavača (8,9).

Ostala pitanja

1. OTA bez dioda za linearizaciju, proračun transkonduktanse (11,12).
2. Translinearni princip i njegova primena na OTA sa diodama (13, 14)
3. OTA sa diodama za linearizaciju, proračun transkonduktanse (električna šema, objašnjenje funkcionisanja, izraz za transkonduktansu) (15,19).
4. Polarizacija OTA pojačavača (20,21)
5. Dvostepeni Milerov OTA (električna šema 24).
6. Invertujući i neinvertujući pojačavači sa i bez povratne sprege (26-28).
7. Filtarske sekcije prvog reda realizovane primenom OTA (29-33).