

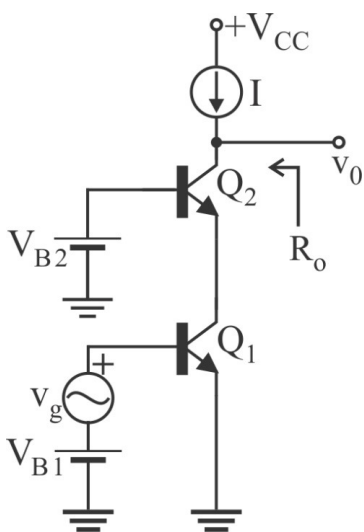
POJAČAVAČI SA DIREKTNOM SPREGOM

Direktno spregnuti pojačavači

Direktno spregnutih pojačavači ne sadrže otpornike za polarizaciju i sprežne kondenzatore. Za razliku od AC spregnutih pojačavača kod kojih se polarizacija svakog pojačavačkog stepena obavlja nezavisno, kod direktno spregnutih pojačavača potrebno je istovremeno uraditi polarizaciju celog kola. Usklađivanje radnih tačaka tranzistora u pojedinim stepenima se komplikovanije i obavlja se pomoću pomerača nivoa.

Za razliku od pojačavača sa kapacitivnom spregom kod pojačavača sa direktnom spregom pojačanje ne slabi sa smanjenjem frekvencije. U frekvencijskoj karakteristici ovih pojačavača nema donje granične frekvencije i oni mogu da pojačavaju i jednosmernu komponentu napona.

Kaskodni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima



Kaskodni pojačavač se sastoji od dva direktno spregnuta pojačavačka stepena, od kojih je prvi (Q1) **u sprezi sa zajedničkim emitorom** i drugi **u sprezi sa zajedničkom bazom** (Q2).

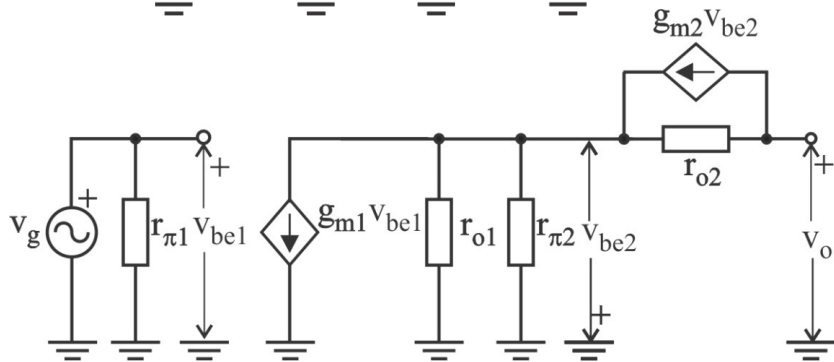
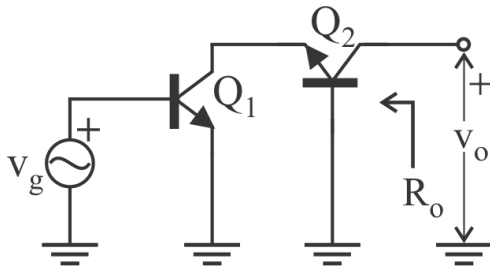
Opterećenje prvog stepena je ulazna otpornost pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom čija je vrednost vrlo mala. Kao posledica toga naponsko pojačanje prvog stepena biće veoma malo, dok će pojačanje struje biti povećano.

Drugi pojačavački stepen ima ulogu strujnog bafera, to praktično znači da može da se modelira kao strujni generator kontrolisan strujom (ulazna otpornost vrlo mala –idealno nula, izlazna otpornost vrlo velika –idealno beskonačna).

Strujni bafer je pojačavač čija je uloga da struju koju daje izvor signala ili prethodni pojačavački stepen (u ovom slučaju pojačavač u sprezi sa zajedničkim emitorom Q1) učini nezavisnom od napona na potrošaču (ili otpornosti potrošača).

Kaskodni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima

Pojačanje pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom je direktno srazmerno otpornosti opterećenja. Pošto je u ovom slučaju to ulazna otpornost sprege sa zajedničkom bazom koja je veoma mala, pojačanje prvog stepena biće malo.



$$v_{be1} = v_g$$

$$g_{m1} \cdot v_{be1} - v_{be2} \cdot \frac{1}{r_{o1}} - v_{be2} \cdot \frac{1}{r_{\pi 2}} = 0$$

$$\frac{v_o + v_{be2}}{r_{o2}} + g_{m2} \cdot v_{be2} = 0$$

$$v_{be2} = \frac{g_{m1}}{\frac{1}{r_{o1}} + \frac{1}{r_{\pi 2}}} \cdot v_g = g_{m1} \cdot r_{o1} \parallel r_{\pi 2} \cdot v_g$$

$$\frac{v_o + v_{be2}}{r_{o2}} + g_{m2} \cdot v_{be2} = 0 \Rightarrow v_o = -(1 + g_{m2} \cdot r_{o2}) \cdot v_{be2}$$

$$A_o = \left. \frac{v_o}{v_g} \right|_{i_o = 0} = -(1 + g_{m2} \cdot r_{o2}) \cdot g_{m1} \cdot r_{o1} \parallel r_{\pi 2}$$

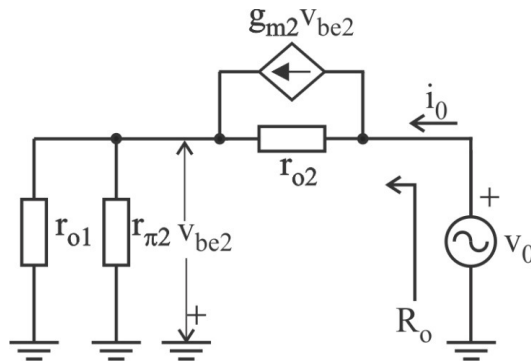
$$g_{m2} \cdot r_{o2} \gg 1 \quad r_{o1} \gg r_{\pi 2} \quad g_{m2} \cdot r_{\pi 2} = \beta_2$$

$$A_o = \left. \frac{v_o}{v_g} \right|_{i_o = 0} \approx -g_{m1} \cdot \beta_2 \cdot r_{o2}$$

A_o je **naponsko pojačanje u praznom hodu** (kada je izlazna struja jednaka nuli $i_o=0$).

Kaskodni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima

Izlazna otpornost kaskodnog pojačavača



Kolo za određivanje izlazne otpornosti kaskodnog pojačavača.

$$-v_{be2} \cdot \frac{1}{r_{o1}} - v_{be2} \cdot \frac{1}{r_{\pi2}} = i_o \Rightarrow v_{be2} = -i_o \cdot r_{o1} \parallel r_{\pi2}$$

$$\frac{v_o + v_{be2}}{r_{o2}} + g_{m2} \cdot v_{be2} = i_o \Rightarrow v_o = i_o \cdot r_{o2} - v_{be2} (1 + g_{m2} \cdot r_{o2})$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o2} + r_{o1} \parallel r_{\pi2} \cdot (1 + g_{m2} \cdot r_{o2}) \approx r_{o2} + r_{\pi2} \cdot g_{m2} \cdot r_{o2}$$

S obzirom da je strujno pojačanje tranzistora Q_2 , β_2 : $\beta_2 = r_{\pi2} \cdot g_{m2} \gg 1$

$$R_o \approx \beta_2 r_{o2}$$

Kaskodni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima

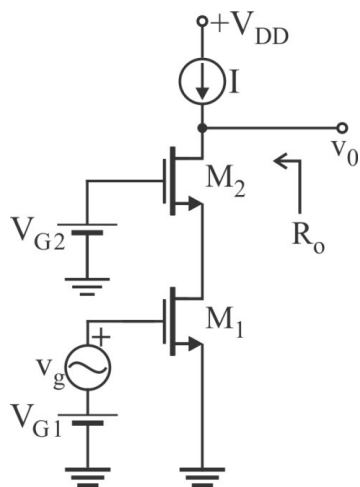
Naponsko pojačanje kaskodnog pojačavača značajno zavisi od otpornosti potrošača. Pojačanje će imati veću vrednost jedino pri veoma velikim otpornostima potrošača, što je posledica velike izlazne otpornosti kaskodnog pojačavača.

$$A = \frac{v_o}{v_g} = A_o \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

Kaskodni pojačavač odlikuje velika vrednost izlazne impedanse. Zbog ove svoje osobine on se često primenjuje za prilagođenje po impedansi kada potrošač ima veliku impedansu ili kada pobudni generator ima malu unutrašnju otpornost. Pored toga može se koristiti i kao izvor konstantne struje.

Kaskodni pojačavač odlikuje širok propusni opseg (velika vrednost gornje granične frekvencije) zbog čega se često koriste u širokopojasnim pojačavačima. Širok propusni opseg pojačavača dobija se zahvaljujući činjenici da je naponsko pojačanje prvog stepena koji je u sprezi sa zajedničkim emitorom vrlo malo.

Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima



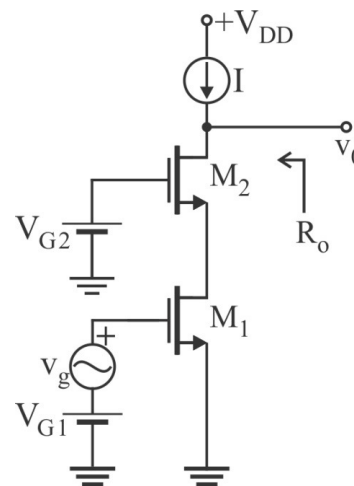
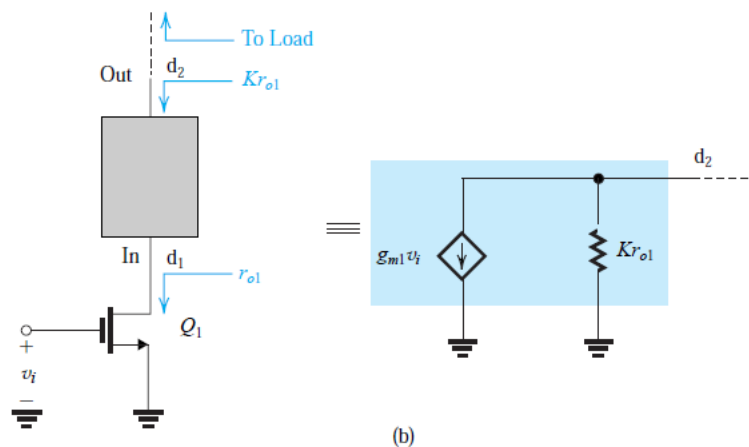
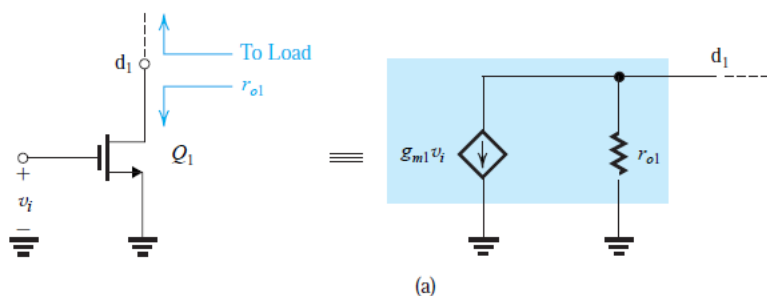
- Kaskodni pojačavač sastoji se od dva pojačavačka stepena, prvi je u sprezi sa **zajedničkim sorsom** (M1) a drugi u sprezi sa **zajedničkim gejtom** (M2).

- Drugi pojačavački stepen u sprezi sa zajedničkim gejtom daje veliku izlaznu otpornost. Ovaj stepen praktično funkcioniše kao strujni bafer, odnosno prenosi izlaznu struju prvog pojačavačkog stepna na izlaz bez slabljenja.

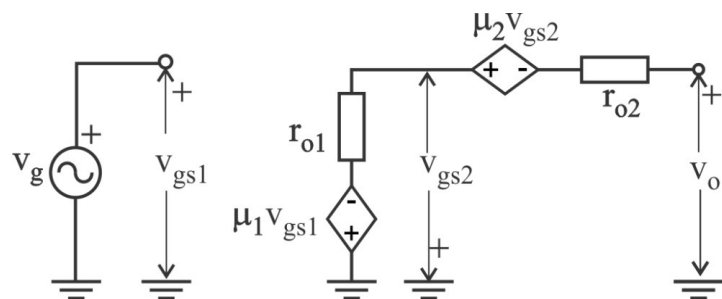
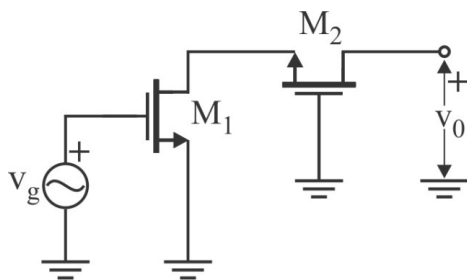
- Jedna od najbitnijih primena kaskodnog pojačavača je realizacija pojačavača sa velikom gornjom graničnom frekvencijom. Ova osobina kaskodnog pojačavča proističe iz činjenice da je pojačanje prvog stepena, koji je u sprezi sa zajedničkim sorsom, malo usled male ulazne otpornosti sprege sa zajedničkim gejtom.

Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima

- Drugi pojačavački stepen u sprezi sa zajedničkim gejtom daje veliku izlaznu otpornost. Ovaj stepne praktično funkcioniše kao strujni bafer, odnosno prenosi izlaznu struju prvog pojačavačkog stepena na izlaz bez slabljenja.



Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima



$$v_{gs1} = v_g$$

$$v_{gs2} = \mu_1 \cdot v_{gs1}$$

$$v_o = -\mu_1 \cdot v_{gs1} - \mu_2 \cdot v_{gs2}$$

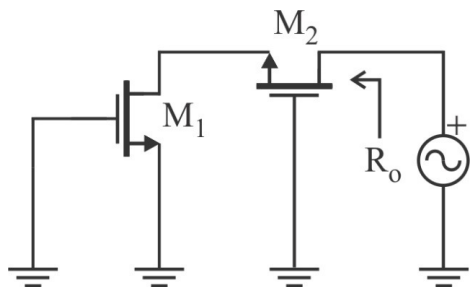
$$v_o = -\mu_1 \cdot v_g - \mu_2 \cdot \mu_1 v_g$$

$$A_o = \left. \frac{v_o}{v_g} \right|_{i_o} = -\mu_1(1 + \mu_2)$$

$$A_o = \left. \frac{v_o}{v_g} \right|_{i_o = 0} \approx -\mu_1 \cdot \mu_2$$

A_0 je **naponsko pojačanje u praznom hodu** (kada je izlazna struja jednaka nuli $i_o=0$).

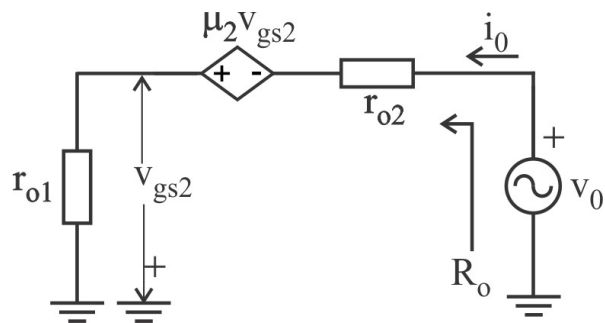
Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima



$$v_{gs2} = -i_o \cdot r_{o1}$$

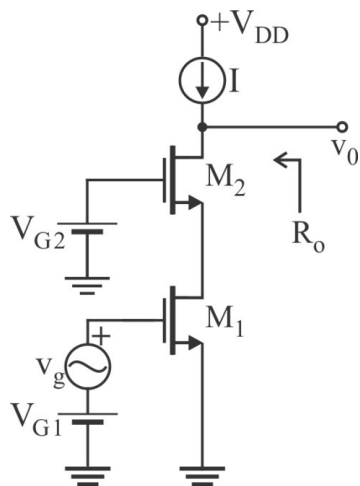
$$v_o = i_o \cdot r_{o1} + i_o \cdot r_{o2} - \mu_2 \cdot v_{gs2}$$

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o1}(1 + \mu_2) + r_{o2}$$



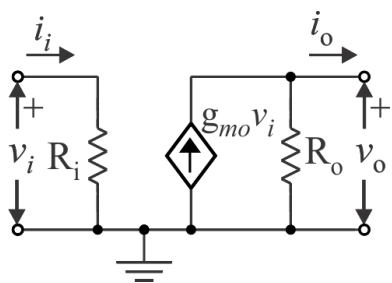
$$R_o \approx r_{o1} \cdot \mu_2 + r_{o2}$$

Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima



Maksimalna teoretska vrednost pojačanja odgovara vrednosti pojačanja u praznom hodu. Vrednost naponskog pojačanja značajno zavisi od otpornosti potrošača. Što je veća otpornost potrošača biće veće pojačanje napona. S obzirom da je izlazna otpornost vrlo velika veće pojačanje se može dobiti jedino ukoliko je opterećenje dinamička otpornost.

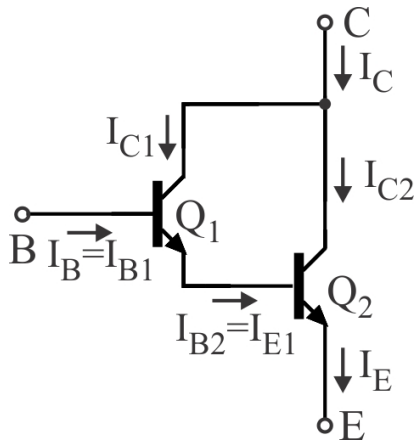
Zbog velike vrednosti izlazne otpornosti uobičajeno je da se izlaz kaskodnog pojačavača modelira kao strujni generator, odnosno transkonduktansa u paraleli sa izlaznom otpornošću.



$$g_{mo} = \frac{A_o}{R_o} = \frac{-\mu_1 \cdot (1 + \mu_2)}{r_{o1} \cdot (1 + \mu_2) + r_{o1}} \approx -g_{m1}$$

Darlingtonova sprega tranzistora

Darlingtonova sprega je neposredna sprega dva tranzistora koja se može okarakterisati kao jedan ekvivalentni tranzistor. Ovaj ekvivalentni tranzistor odlikuje se velikim koeficijentom strujnog pojačanja i velikom ulaznom otpornošću.



$$I_B = I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_{E1} = (1 + \beta_1) \cdot I_{B1} + (1 + \beta_1) \cdot I_{C01}$$

$$I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1} + (1 + \beta_1) I_{C01}$$

$$I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2} + (1 + \beta_1) I_{C02}$$

$$I_C = (1 + \beta_1) \cdot \beta_2 \cdot I_B + \beta_1 \cdot I_B + (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2) \cdot I_{C01} + (1 + \beta_2) \cdot I_{C02}$$

$$\beta_1 \gg 1 \quad \beta_2 \gg 1$$

$$I_C \approx \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_B + \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_{C01}$$

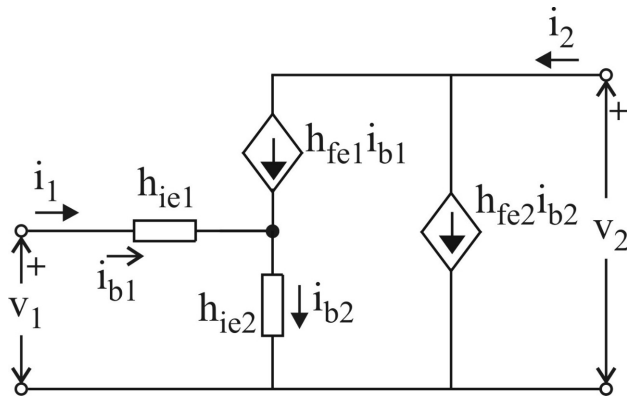
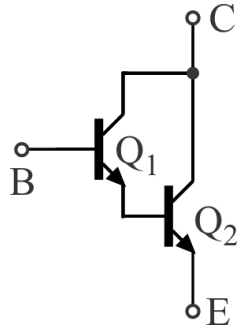
$$I_C \approx \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_B$$

Kada se ne razmatra uticaj temperature

Koeficijent strujnog pojačanja Darlingtonove sprege približno je jednak proizvodu koeficijenata strujnog pojačanja oba tranzistora.

Iz izaraza za struju kolektora Darlingtonovog para može se zaključiti da inverzna struja zasićenja prvog tranzistora ima daleko veći uticaj na struju kolektora nego inverzna struja zasićenja drugog tranzistora. Ova činjenica je bitna kada se razmatra uticaj temperature.

Darlingtonova sprega tranzistora



$$i_1 = i_{b1}$$

$$i_{b2} - h_{fe1} \cdot i_{b1} - i_{b1} = 0$$

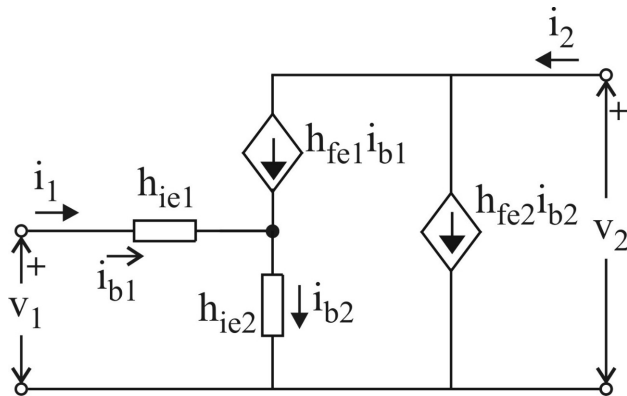
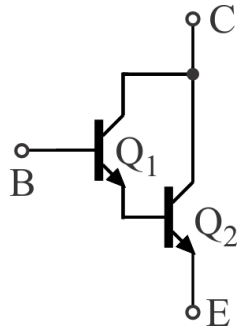
$$v_1 = h_{ie1} \cdot i_{b1} + h_{ie2} \cdot i_{b2}$$

$$v_2 = h_{ie1} \cdot i_1 + h_{ie2} \cdot (1 + h_{fe1}) \cdot i_1$$

$$h_i = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2 = 0} = h_{ie1} + h_{ie2} \cdot (1 + h_{fe1})$$

$$r_\pi = r_{\pi1} + r_{\pi2} \cdot (1 + \beta_1)$$

Darlingtonova sprega tranzistora



$$i_{b1} = i_1$$

$$i_{b2} = i_{b1} + h_{fe1} \cdot i_{b1}$$

$$i_2 = h_{fe1} \cdot i_{b1} + h_{fe2} \cdot i_{b2}$$

$$i_2 = h_{fe1} \cdot i_1 + h_{fe2}(1 + h_{fe1}) \cdot i_1$$

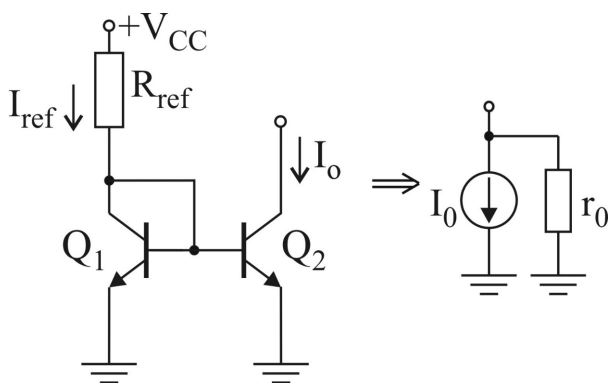
$$h_f = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2 = 0} = h_{fe1} + h_{fe2} \cdot (1 + h_{fe1})$$

$$h_f = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2 = 0} \approx h_{fe1} \cdot h_{fe2}$$

$$\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2$$

Strujno pojačanje je približno jednako proizvodu strujnih pojačanja oba tranzistora.

Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala



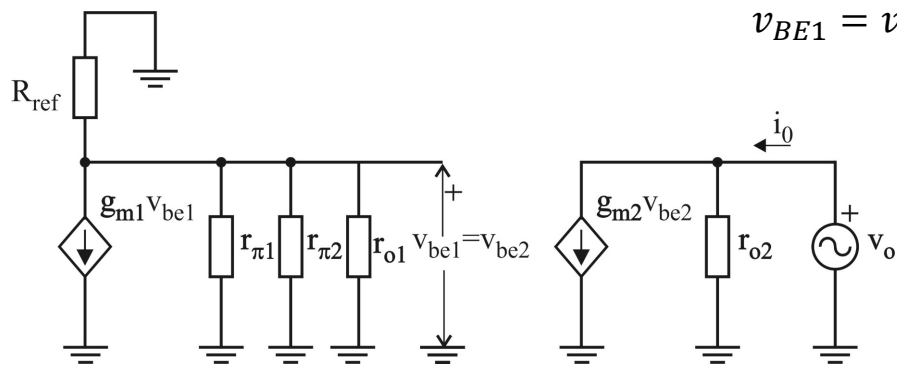
Tranzistor Q1 je vezan kao dioda (povezani su baza i kolektor). Ova dioda daje referentni napon. Aproksimacija da su struje kolektora Q1 jednake referentnoj struji važi ukoliko je koeficijent strujnog pojačanja β dovoljno veći od 1.

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ref}}$$

$$I_{ref} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$I_{C1} = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{ref}$$

Tranzistori koji sačinjavaju strujno ogledalo su identičnih karakteristika. S obzirom da struja kolektora prvenstveno zavisi od napona između baze i emitora a vrlo malo zavisi od napona između kolektora i emitora sledi da je jednosmerna struja izvora konstantne struje I_0 jednaka:



$$v_{BE1} = v_{BE2} \Rightarrow I_{C1} \approx I_{C2}$$

$$I_o = I_{C2} \approx I_{ref}$$

$$v_{be1} = v_{be2} = 0$$

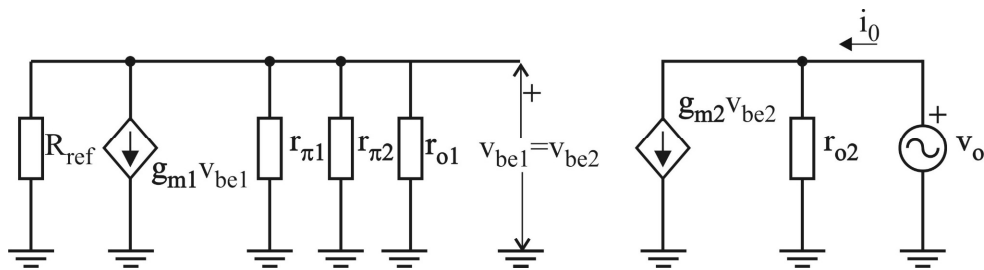
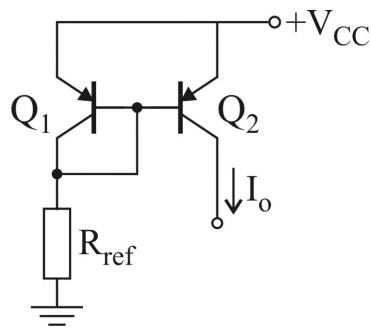
$$r_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o2}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_0}$$

Dinamička otpornost izvora konstantne struje r_o je veoma velika i jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora Q_2 , r_{o2} .

Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala

Slika prikazuje varijantu izvora konstantne struje čija je struja usmerena tako da utiče u kolo (current source). Kada je struja izvora konstantne struje usmerena tako da ističe iz kola (kao u prethodnom slajdu) ona se zove curren sink.



$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ref}}$$

$$I_{ref} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$$

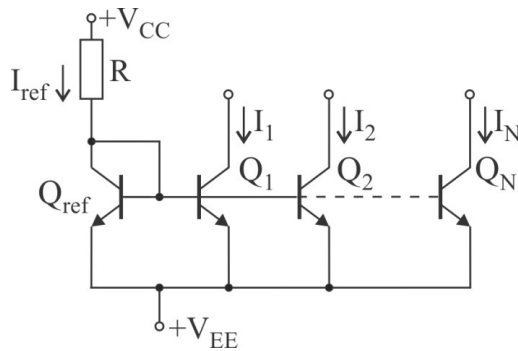
$$I_{C2} \approx I_{C1} = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

$$v_{be1} = v_{be2} = 0$$

$$r_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o2}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_o}$$

Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala



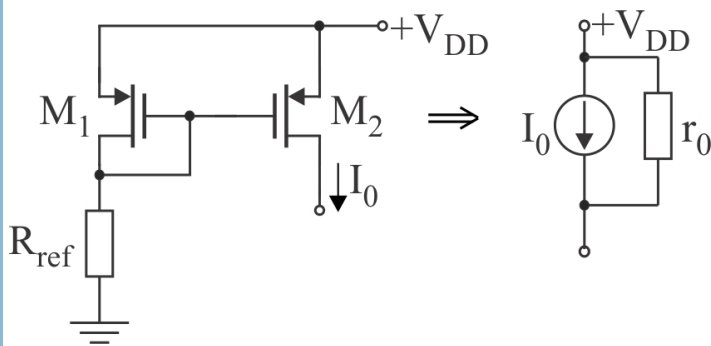
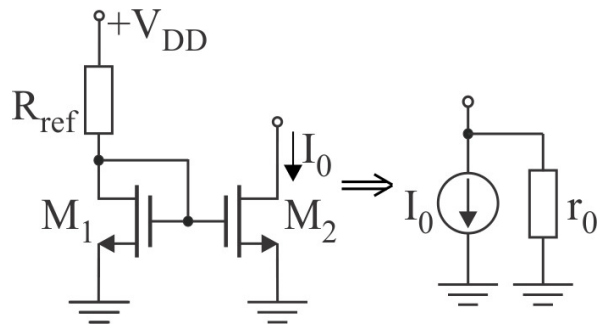
Tranzistor koji se koristi kao dioda (Q_{ref}) može da posluži kao izvor referentnog napona za više tranzistora u kolu istovremeno.

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE} + V_{EE}}{R}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = \dots = V_{BEN} \Rightarrow I_1 = I_2 = \dots = I_N$$

Svi tranzistori koji čine izvor konstantne struje (Q_1 - Q_N) su identičnih karakteristika. Ukoliko je napon na emitorskom spoju isti kod svih tranzistora može da smatramo da su im struje kolektora približno jednake.

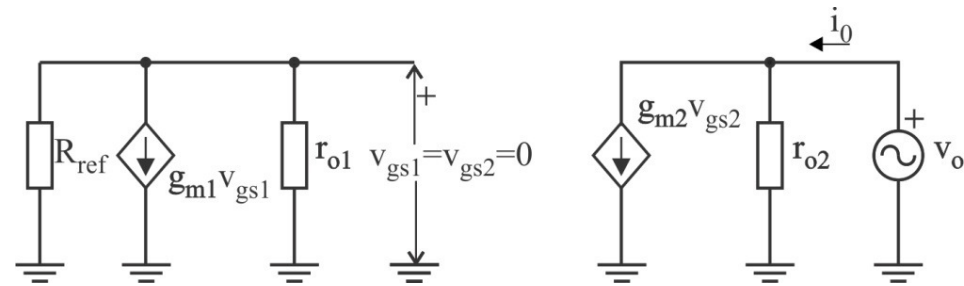
Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala realizovan MOSFET tranzistorima



$$V_{GS1} = V_{DD} - R_{ref} \cdot A \cdot (V_{GS1} - V_{t1})^2$$

$$I_{D1} = A \cdot (V_{GS1} - V_{t1})^2$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_o$$



Dinamička otpornost izvora konstantne struje r_o je jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora M_2 , r_{o2} .

$$r_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o2}$$

Tranzistori koji sačinjavaju strujno ogledalo, M_1 i M_2 , treba da budu istih karakteristika: $A_1 = A_2$, $V_{t1} = V_{t2}$.

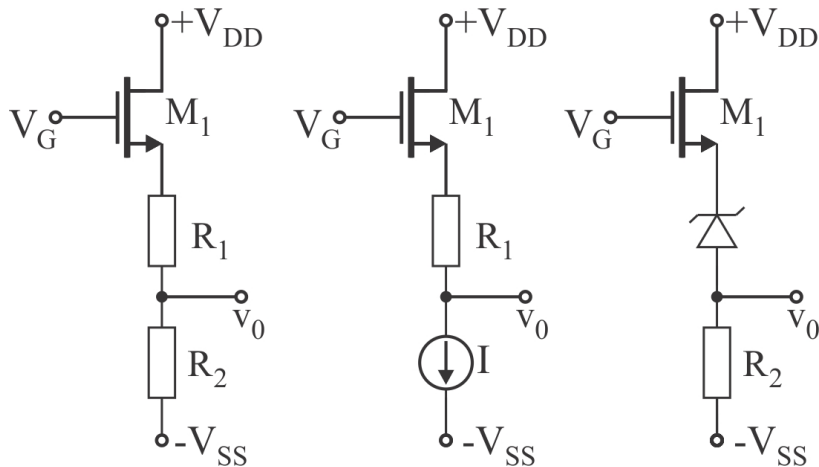
Izvor konstantne struje obavlja svoju funkciju sve dok je M_2 u oblasti zasićenja, odnosno dok izlazni napon V_o zadovoljava uslov:

$$V_o = V_{DS2} > V_{GS2} - V_{t2}$$

Ovo kolo funkcioniše kao izvor konstantne struje i kada dimenzije tranzistora nisu iste, a odnos struja će biti:

$$\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

Pomerači nivoa



Kod direktno spregnutih pojačavača izlazni jednosmerni napon prethodnog stepena nije jednak ulaznom jednosmernom naponu narednog stepena.

Usklađivanje radnih tačaka tranzistora u pojedinim stepenima direktno spregnutih pojačavača obavlja se pomoću pomerača nivoa. Ovde su prikazane tri varijante pomerača nivoa koji se koriste za polarizaciju MOSFET-a.

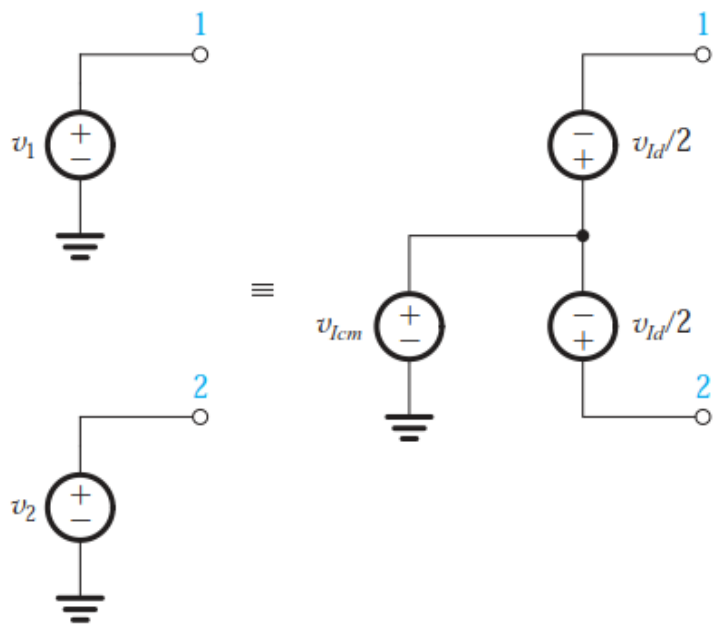
$$V_G - V_o = V_{GS} - R_1 \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_G - V_o = V_{GS} - R_1 \cdot I_o$$

$$V_G - V_o = V_{GS} - V_Z$$

Diferencijalno pojačanje i pojačanje srednje vrednosti

Diferencijalni napon i srednja vrednost napona



Dva proizvoljna napona mogu se izraziti preko **srednje vrednosti napona** v_{icm} i **diferencijalnog napona** v_{id} .

$$v_{ID} = v_2 - v_1$$

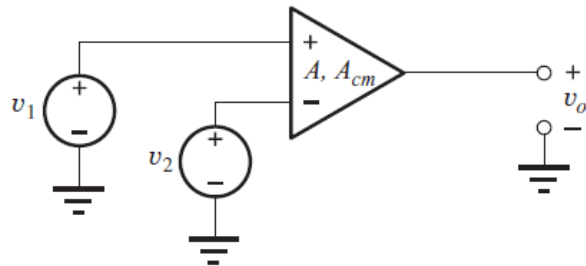
$$v_{ICM} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

$$v_1 = v_{ICM} - \frac{v_{ID}}{2}$$

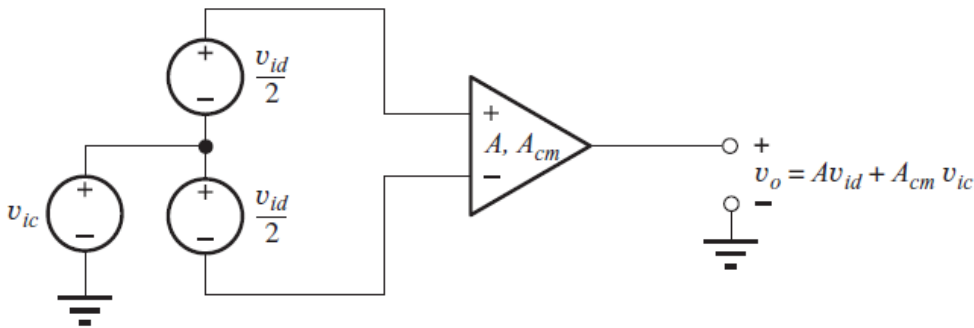
$$v_2 = v_{ICM} + \frac{v_{ID}}{2}$$

Diferencijalno pojačanje i pojačanje srednje vrednosti

Ukoliko je kolo linearno može se primeniti princip superpozicije prema kome se izlazni napon dobija preko analize dve različite pobude. Prva odgovara takozvanoj simetričnoj pobudi kada deluje samo srednja vrednost napona $v_1=v_2$. Druga odgovara asimetričnoj pobudi kada deluje diferencijalni napon, $v_1=-v_2$.



$$v_o = A_d \cdot v_{id} + A_{cm} \cdot v_{ic}$$



$$v_o = A_d (v_1 - v_2) + A_{cm} \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)$$

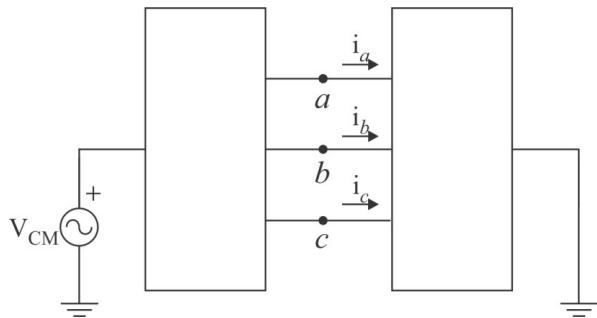
$$A_d = \left. \frac{v_o}{v_1 - v_2} \right|_{v_1 = -v_2}$$

Diferencijalno pojačanje je pojačanje pri asimetričnoj pobudi (kada su ulazni signali u protivfazi)

$$A_c = \left. \frac{v_o}{\left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)} \right|_{v_1 = v_2}$$

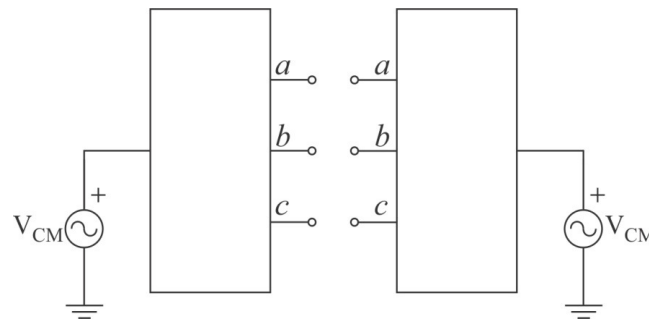
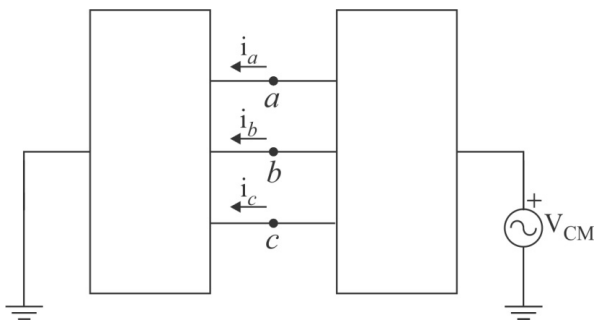
Pojačanje srednje vrednosti je pojačanje pri simetričnoj pobudi (kada su ulazni signali idenitični)

Bisekciona teorema



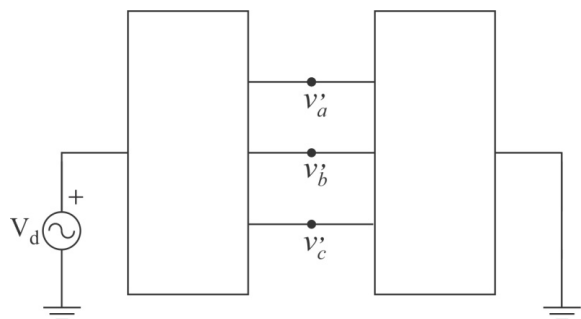
Razmatramo situaciju kada je kolo idealno simetrično i pobuđuje se sa dva identična naponska generatora u obe polovine kola. Kada se primeni princip superpozicije zaključujemo da je rezultujuća struja kroz čvorove na liniji simetrije (a,b,c) jednaka nuli.

Kada je pobuda simetrična tačke na liniji simetrije se zamenjuju otvorenim kolom.

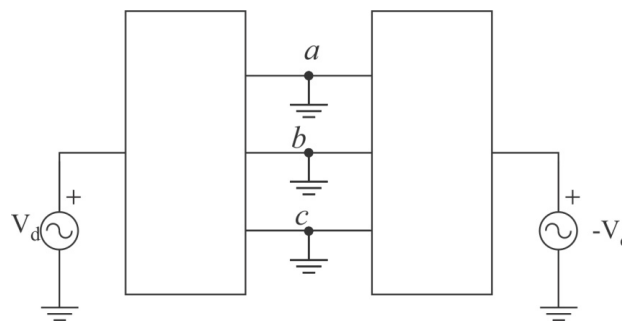
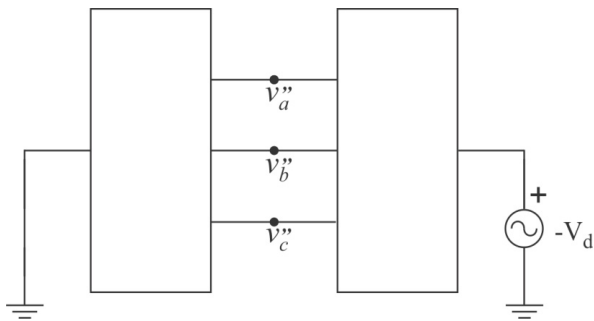


Bisekciona teorema

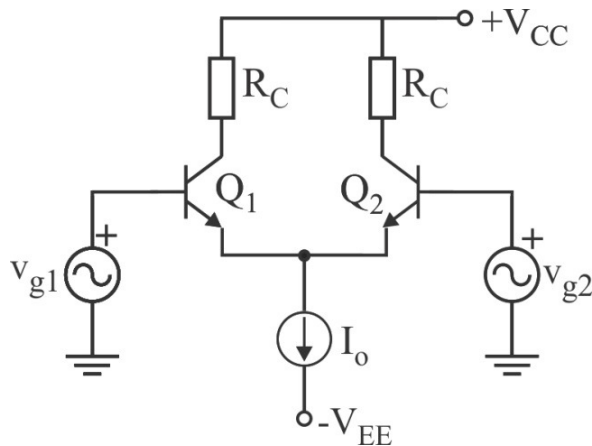
Razmatramo situaciju kada je kolo idealno simetrično i pobuđuje se sa dva naponska generatora koji su jednaki po amplitudi i suprotnog znaka. Kada se primeni princip superpozicije dobiće se da je potencijal čvorova na liniji simetrije jednak nuli.



Kada je pobuda asimetrična tačke na liniji simetrije se spajaju sa masom.



Diferencijalni pojačavač



Diferencijalni pojačavač pojačava razliku dva ulazna napona. Ukoliko bi kolo bilo idealno simetrično pri identičnoj pobudi na oba ulaza razlika izlaznih napona bila bi jednaka nuli. Pod simetrijom podrazumevamo da su karakteristike oba tranzistora identične i da su otpornici u kolu kolektora, R_C , takodje jednaki.

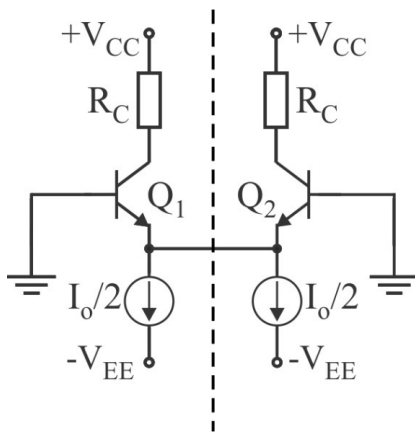
Ukoliko je razlika ulaznih napona jednaka nuli struje koje teku kroz tranzistore Q_1 i Q_2 biće iste i jednake polovini struje izvora konstantne struje I_0 . Kada se poveća napon na bazi jednog tranzistora (u odnosu na bazu drugog tranzistora) doći će do povećanja njegove struje baze kao i struje kolektora. Istovremeno će se smanjiti struje drugog tranzistora za isti iznos. Ukoliko su promene ulaznog napona dovoljno male promene struja u oba tranzistora biće linearne.

Kod diferencijalnog pojačavača automatski se vrši kompenzacija svih promena struja i napona. Ukoliko usled porasta temperature parametri tranzistora u diferencijalnom paru (Q_1 i Q_2) promene vrednosti to neće imati uticaj izlazni napon.

Diferencijalni pojačavač

Jednosmerni režim

Može da se primeni bisekciona teorema za slučaj simetrične pobude.

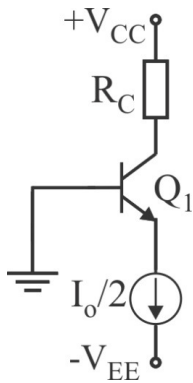


$$I_E = \frac{I_o}{2}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot I_E \approx \frac{I_o}{2}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - V_E$$

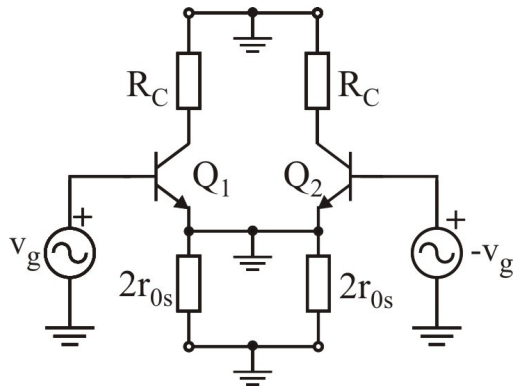
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot \frac{I_o}{2} + V_{BE}$$



Diferencijalni pojačavač

Diferencijalno pojačanje

Diferencijalno pojačanje određujemo pri asimetričnoj pobudi, odnosno kada su ulazni naponi jednaki po amplitudi a suprotnog znaka $v_{g1} = -v_{g2}$.



$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} = -g_m \cdot R_C || r_o \cdot \frac{v_{id}}{2}$$

Diferencijalno pojačanje kada je izlaz simetričan, odnosno između kolektora tranzistora

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} \Big|_{v_{g1} = -v_{g2}} \approx -g_m \cdot R_C$$

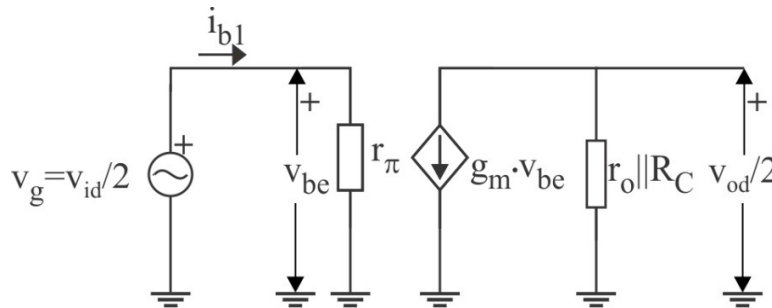
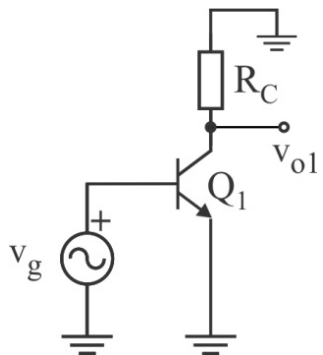
Diferencijalno pojačanje kada je izlaz asimetričan, odnosno na kolektoru jednog od tranzistora

$$A_d = \frac{v_{o1}}{v_{id}} \Big|_{v_{g1} = -v_{g2}} \approx -\frac{g_m \cdot R_C}{2}$$

$$\frac{v_{id}}{2} = i_{b1} \cdot r_\pi$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{b1}} = 2 \cdot r_\pi$$

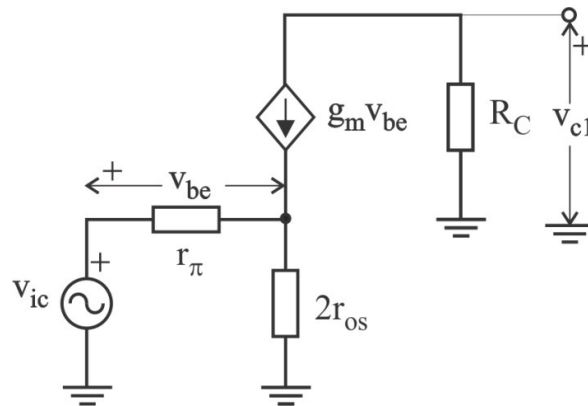
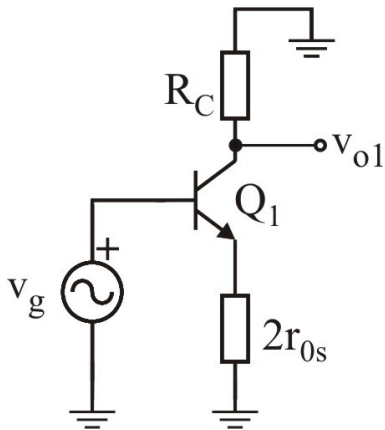
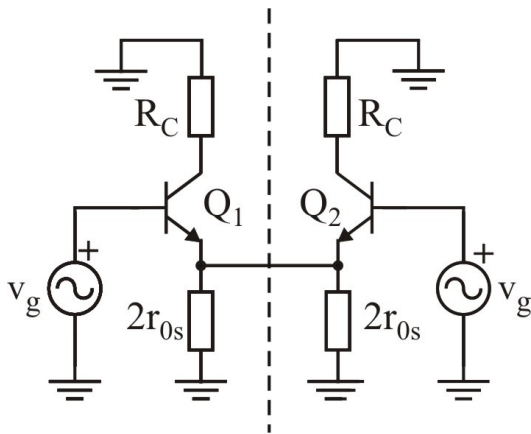
R_{id} je diferencijalna ulazna otpornost



Diferencijalni pojačavač

Pojačanje srednje vrednosti

Pojačanje srednje vrednosti AC određuje se pri simetričnoj pobudi, odnosno kada su pobudni generatori identični.



$$v_e = \left(\frac{v_{be}}{r_{\pi}} + g_m \cdot v_{be} \right) \cdot 2 \cdot r_{os} = v_{ic} - v_{be}$$

$$v_{be} = \frac{v_{ic}}{1 + \left(\frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) \cdot 2 \cdot r_{os}}$$

$$v_{oc} = -R_C \cdot g_m \cdot v_{be}$$

$$A_C = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + \left(\frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) \cdot 2 \cdot r_{os}}$$

$$A_C \approx \frac{-g_m \cdot R_C}{2 \cdot r_{os} \cdot g_m}$$

$$A_C \approx -\frac{R_C}{2 \cdot r_{os}}$$

$$R_{ic} = \frac{v_{ic}}{2i_b} = \frac{r_{\pi}}{2} + r_{os} \cdot (\beta + 1)$$

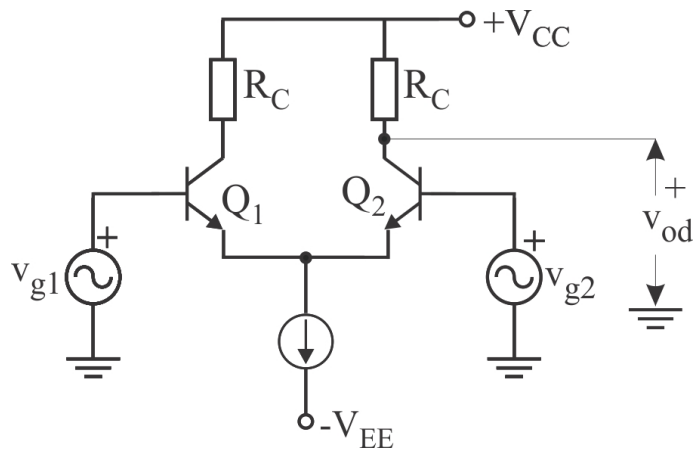
R_{ic} je ulazna otpornost za srednju vrednost signala

$$R_{ic} \approx r_{os} \cdot \beta$$

Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač sa simetričnim izlazom (izlaz između kolektora tranzistora) ima beskonačno veliki faktor potiskivanja ukoliko su parametri tranzistora i kolektorski otpornici identični.

Ukoliko se razmatra asimetričan izlaz (izlaza na kolektoru jednog od tranzistora) faktor potiskivanja će biti srazmeran unutrašnjoj otpornosti izvora konstantne struje i transkonduktansi tranzistora u diferencijalnom paru. Za ovaj slučaj diferencijalno pojačanje je duplo manje nego kada je simetričan izlaz.

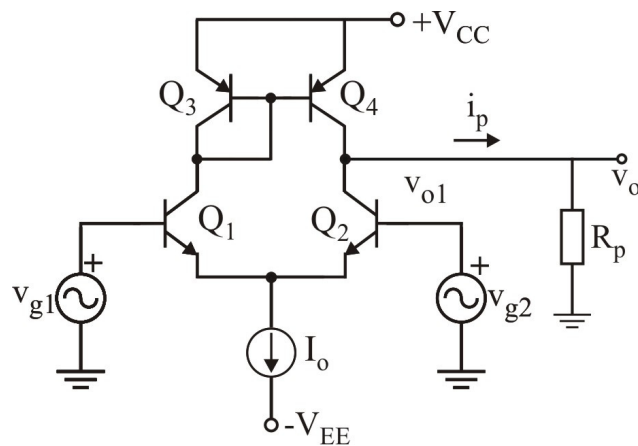


$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{\frac{1}{2} \cdot g_m \cdot R_C}{\frac{R_C}{2 \cdot r_{os}}}$$

$$CMRR \approx r_{os} \cdot g_m$$

Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem

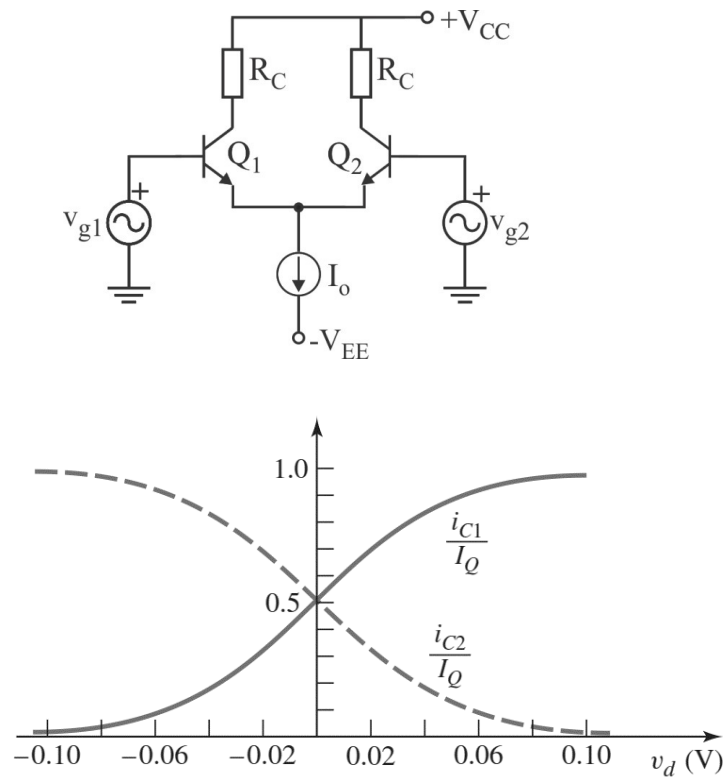
U integriranoj tehnologiji umesto kolektorskih otpornika koristi se strujno ogledalo. Tranzistori koji čine strujno ogledalo Q3 i Q4 čine takozvano aktivno opterećenje. Strujno ogledalo preslikava struju kolektora tranzistora Q3 u struju kolektora tranzistora Q4 tako da je izlazna struja, i_p , jednaka razlici struja kolektora tranzistora u diferencijalnom paru Q1 i Q2.



$$i_p = i_{c1} - i_{c2} = g_m \cdot v_d$$
$$A_d = \frac{v_o}{v_d} = g_m \cdot R_p$$



Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima



$$I_o = i_{E1} + i_{E2}$$

$$i_{C1} = \frac{1}{\alpha} \cdot i_{E1} \quad i_{C2} = \frac{1}{\alpha} \cdot i_{E2}$$

$$i_{C1} = I_S \cdot e^{v_{BE1}/V_T} \quad i_{C2} = I_S \cdot e^{v_{BE2}/V_T}$$

$$v_{id} = v_{g1} - v_{g2} = v_{BE1} - v_{BE2}$$

$$I_o = \frac{1}{\alpha} (i_{C1} + i_{C2})$$

$$I_o = \frac{1}{\alpha} \cdot i_{C1} \cdot \left(1 + \frac{i_{C2}}{i_{C1}} \right)$$

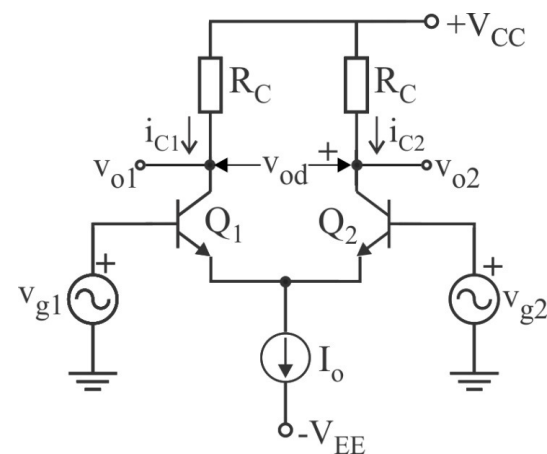
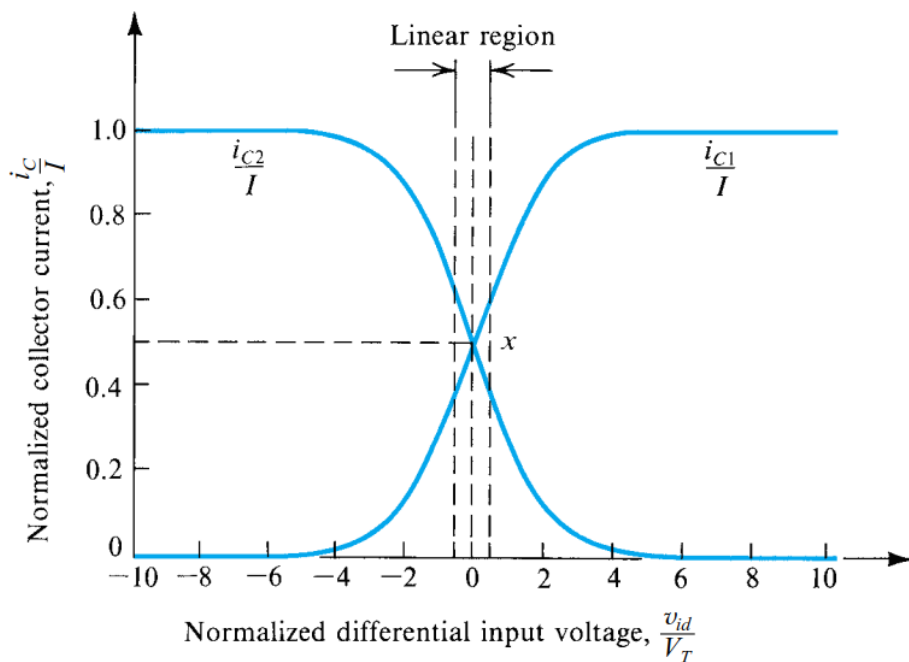
$$I_o = \frac{1}{\alpha} \cdot i_{C2} \cdot \left(1 + \frac{i_{C1}}{i_{C2}} \right)$$

$$i_{C1} = \frac{\alpha \cdot I_o}{1 + e^{-v_{id}/V_T}}$$

$$i_{C2} = \frac{\alpha \cdot I_o}{1 + e^{v_{id}/V_T}}$$

Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima

Linearna oblast je veoma uska i prostire se u granicama $\pm \Delta v_{id} < V_T$. Struje će biti u linearnoj oblasti ukoliko je amplituda ulaznog napona manja od 25 mV. Kada amplituda ulaznog napona dostigne vrednost od $4 V_T$ jedan od tranzistora ući će u zasićenje i sva struja izvora konstantne struje će teći kroz taj tranzistor, dok će drugi tranzistor preći u režim u zakočenja.



$$i_{c1} = \frac{\alpha \cdot I_o}{1 + e^{-v_{id}/V_T}}$$

$$i_{c2} = \frac{\alpha \cdot I_o}{1 + e^{v_{id}/V_T}}$$

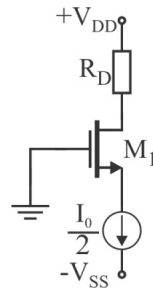
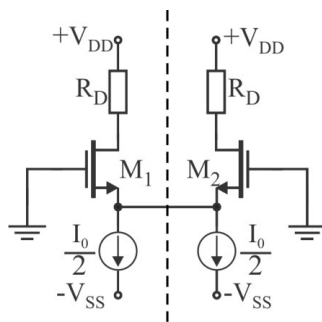
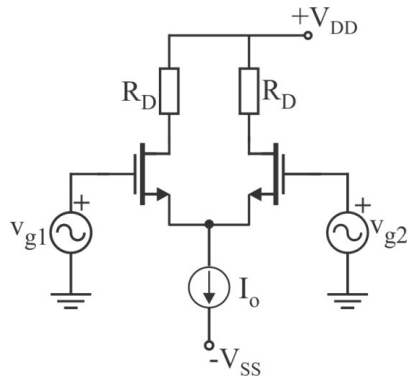
$$v_{od} = v_{o2} - v_{o1} = R_C(i_{c1} - i_{c2})$$

$$v_{od} = \alpha \cdot R_C \cdot I_o \cdot \frac{e^{v_{id}/V_T} - 1}{e^{v_{id}/V_T} + 1}$$

Diferencijalni pojačavač

Polarizacija diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima

S obzirom da je kolo simetrično može se primeniti bisekciona teorema.



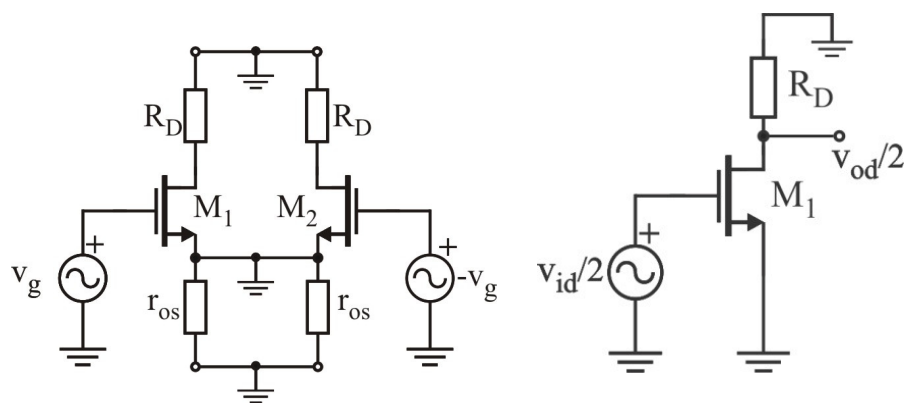
$$A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = I_D = \frac{I_o}{2}$$

$$V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_o}{2A}}$$

$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$

Diferencijalni pojačavač

Diferencijalno pojačanje

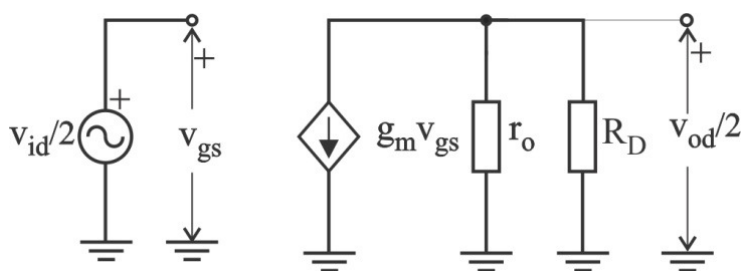


Pojačanje srednje vrednosti određuje se pri simetričnoj pobudi. Rešenje je dobijeno primenom bisekcionne teoreme.

$$\frac{v_{od}}{2} = -g_m \cdot R_D || r_{os} \cdot \frac{v_{id}}{2} \approx -g_m \cdot R_D \cdot \frac{v_{id}}{2}$$

Diferencijalno pojačanje kada je izlaz simetričan, odnosno između drejnova tranzistora.

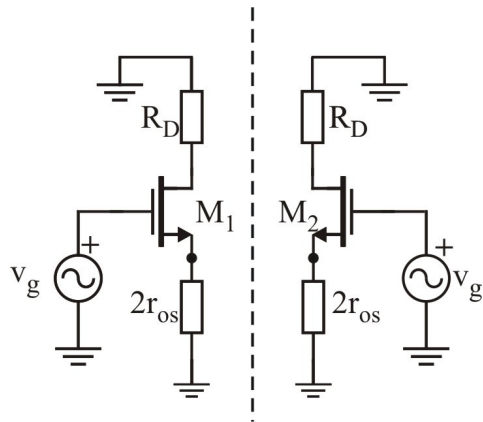
$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m \cdot R_D$$



Diferencijalno pojačanje kada je izlaz asimetričan, odnosno na drejnu jednog od tranzistora.

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -\frac{1}{2} g_m \cdot R_D$$

Diferencijalni pojačavač



Pojačanje srednje vrednosti

Pojačanje srednje vrednosti određuje se pri simetričnoj pobudi.

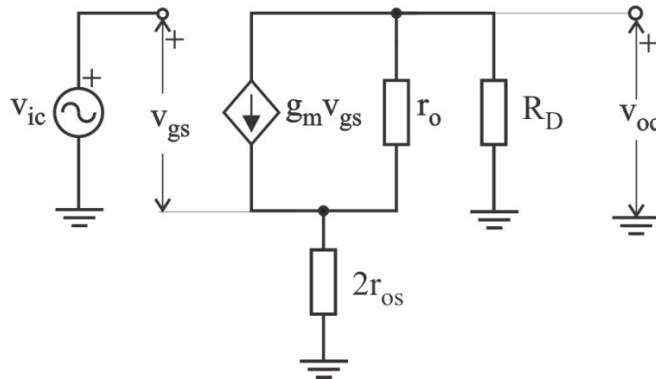
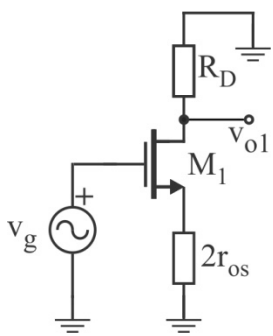
Pojačanje A_C je sračunato za slučaj kada je izlaz asimetričan, odnosno izlazni napon potencijal drejna jednog od tranzistora.

$$v_{gs} = v_{ic} - v_{gs} \cdot g_m \cdot 2 \cdot r_{os}$$

$$v_{oc} = -R_D \cdot i_d - R_D \cdot g_m \cdot v_{gs}$$

$$v_{oc} = v_{ic} \cdot \left[\frac{-g_m \cdot R_D}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{os}} \right]$$

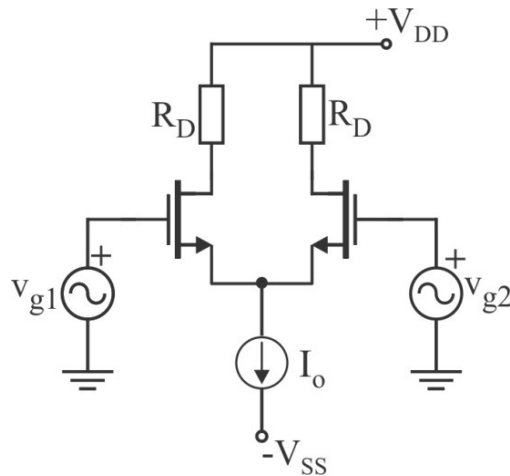
$$A_C = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = \frac{-g_m \cdot R_D}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{os}}$$



Diferencijalni pojačavač

Diferencijalni pojačavač sa simetričnim izlazom ima beskonačno veliki faktor potiskivanja ukoliko su parametri tranzistora i kolektorski otpornici identični, jer je pojačanje srednje vrednosti u tom slučaju nula. Ukoliko se razmatra asimetričan izlaz (izlaz na drejnu jednog od tranzistora) faktor potiskivanja će biti srazmeran unutrašnjoj otpornosti izvora konstantne struje, r_{os} , i transkonduktansi tranzistora u diferencijalnom paru, g_m .

Svaka nesimetrija u kolu odnosno razlika u parametrima prouzrokuje pojačanje srednje vrednosti različito od nule. U praksi uvek postoje razlike u parametrima komponenata.



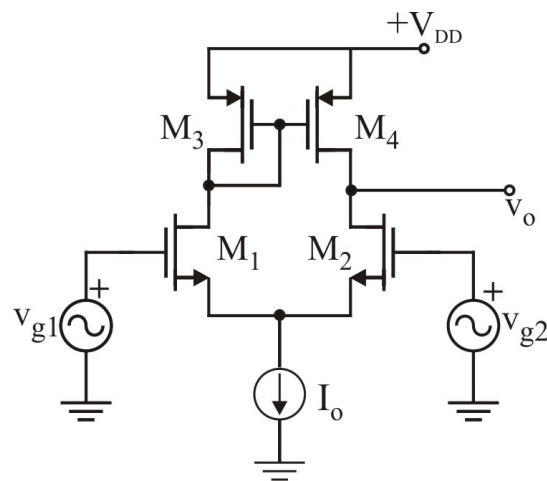
$$A_d = -g_m \cdot R_D \cdot \frac{1}{2}$$

$$A_c = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = \frac{-g_m \cdot R_D}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{os}}$$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{1}{2} + g_m \cdot r_{os}$$

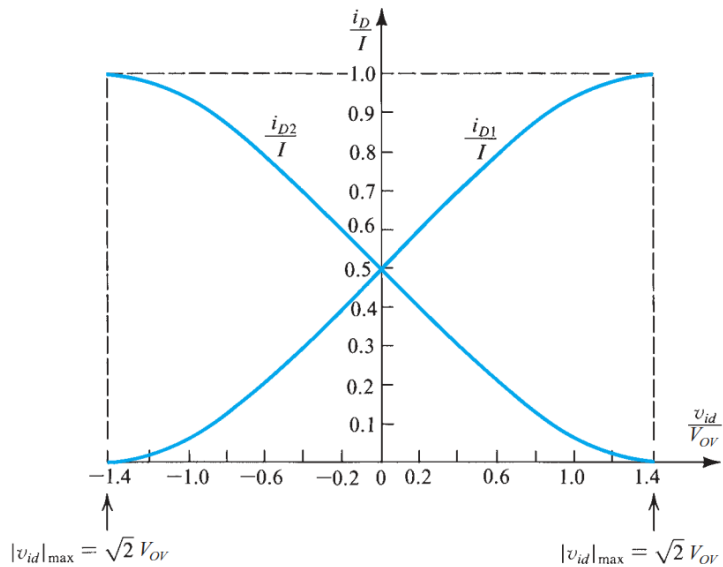
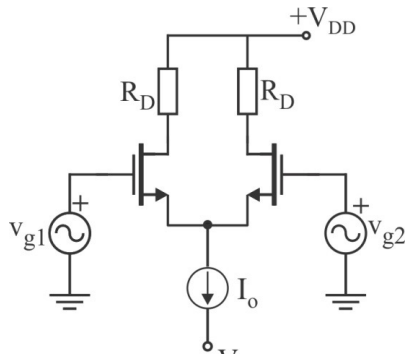
$$CMRR \approx r_{os} \cdot g_m$$

Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem



U integrisanoj tehnologiji se umesto otpornika kao opterećenje koristi strujno ogledalo. Strujno ogledalo preslikava struju drejna tranzistora M_3 (ili M_1) u struju drejna tranzistora M_4 . Izlazna struja jednaka je razlici struja tranzistora u diferencijalnom paru M_1 i M_2 . Tranzistori koji čine strujno ogledalo M_3 i M_4 čine takozvano aktivno opterećenje. Ovo kolo naziva se CMOS diferencijalni pojačavač.

Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima



$$\begin{aligned} i_{D1} + i_{D2} &= I_o \\ v_{GS1} - v_{GS2} &= v_{ID} \\ i_{D1} &= A \cdot (v_{GS1} - V_t)^2 \\ i_{D2} &= A \cdot (v_{GS2} - V_t)^2 \end{aligned}$$

$$\sqrt{i_{D1}} - \sqrt{i_{D2}} = \sqrt{A} \cdot v_{ID}$$

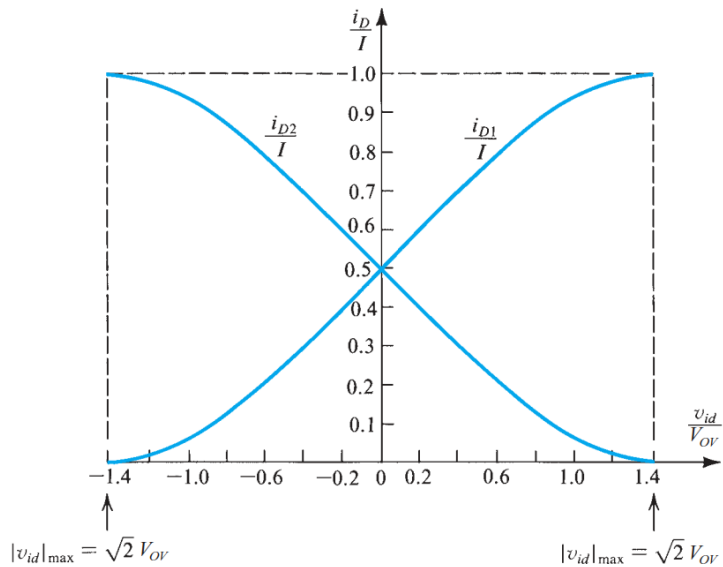
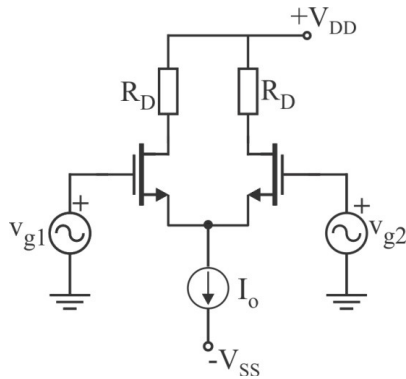
$$I_o - 2 \cdot \sqrt{i_{D1} \cdot i_{D2}} = A \cdot v_{ID}^2$$

$$i_{D1} \cdot (I_o - i_{D1}) = \frac{1}{4} (I_o - A \cdot v_{ID}^2)^2$$

$$i_{D1} = \frac{I_o}{2} + v_{ID} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot I_o}{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{2I_o} \cdot v_{ID}^2}$$

$$i_{D1} = \frac{I_o}{2} - v_{ID} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot I_o}{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{2I_o} \cdot v_{ID}^2}$$

Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima



$$i_{D1} = \frac{I_o}{2} + v_{ID} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot I_o}{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{2I_o} \cdot v_{ID}^2}$$

$$i_{D1} = \frac{I_o}{2} - v_{ID} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot I_o}{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{2I_o} \cdot v_{ID}^2}$$

$$v_{od} = R_D(i_{D1} - i_{D2})$$

$$v_{od} = v_{ID} \cdot R_D \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot I_o}{A} - v_{ID}^2}$$

$$A_d = \left. \frac{dv_{od}}{dv_d} \right|_{v_d = 0} = R_D \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot I_o}{2}}$$

$$A_d = g_m \cdot R_D$$

Ulazne karakteristike diferencijalnog pojačavača

Usled neuparenosti karakteristika tranzistora u diferencijalnom pojačavaču pojaviće se određena odstupanja u jednosmernoj vrednosti izlaznog diferencijalnog napona.

Jednosmerni napon koji treba dovesti na ulazne priključke diferencijalnog pojačavača tako da izlazni napon bude jednaka nuli naziva se **napon razdešenosti ili ofset napon**.

Da bi bipolarni tranzistori bili u aktivnom režimu rada neophodno je da teku određene struje baza. Usled neuparenosti komponenata ove dve struje neće biti istie.

Jednosmerna struja koju treba dovesti između ulaznih priključaka takoda razlika između ulaznih struja polarizacije bude jednaka nuli naziva se **ofset struja**.

Ulazne karakteristike diferencijalnog pojačavača

Usled neuparenosti karakteristika tranzistora u diferencijalnom pojačavaču pojaviće se određena odstupanja u jednosmernoj vrednosti izlaznog diferencijalnog napona.

Jednosmerni napon koji treba dovesti na ulazne priključke diferencijalnog pojačavača tako da izlazni napon bude jednaka nuli naziva se **napon razdešenosti ili ofset napon**.

Da bi bipolarni tranzistori bili u aktivnom režimu rada neophodno je da teku određene struje baza. Usled neuparenosti komponenata ove dve struje neće biti iste.

Jednosmerna struja koju treba dovesti između ulaznih priključaka tako da razlika između ulaznih struja polarizacije bude jednaka nuli naziva se **ofset struja**.

POJAČAVAČI SA DIREKTNOM SPREGOM

Elementarna pitanja

- 1. Srednja vrednost signala i diferencijalni signal; Bisekciona teorema.**
- 2. Diferencijalno pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorima.**
- 3. Pojačanje srednje vrednosti i faktor potiskivanja diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima.**

Ostala ispitna pitanja

- 4. Kaskodni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima.**
- 5. Kaskodni pojačavač sa MOSFET tranzistorima.**
- 6. Darlingtonova sprega tranzistora.**
- 7. Izvor konstantne struje realizovan strujnim ogledalom.**
- 8. Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima.**
- 9. Diferencijalno pojačanje, pojačanje srednje vrednosti i faktor potiskivanja diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima.**
- 10. Prenosna karakteristika diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima.**