POJAČAVAČI SA DIREKTNOM SPREGOM

Direktno spregnuti pojačavači

Direktno spregnutih pojačavači se koriste u integrisanim kolima. Ova kola ne sadrže sprežne kondenzatore kao ni otpornike za polarizaciju.

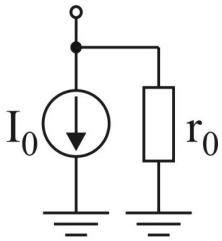
Za razliku od kapacitivno spregnutih pojačavača, kod kojih se polarizacija svakog pojačavačkog stepena obavlja nezavisno, kod direktno spregnutih pojačavača potrebno je istovremeno uraditi polarizaciju celog kola. Usklađivanje radnih tačaka tranzistora u pojedinim pojačavačkim stepenima je komplikovanije i obavlja se pomoću posebnih potkola koja se zovu pomerači nivoa.

Za razliku od kapacitivno spregnutih pojačavača, pojačanje pojačavača sa direktnom spregom se ne smanjuje na nižim frekvencijama signala. To praktično znači da u frekvencijskoj karakeristici direktno spregnutih pojačavača postoji samo gornja granična frekvencija. Ovi pojačavači pojačavaju i jednosmernu komponentu signala.

Izvori konstantne struje

Polarizacija tranzistora u integrisanim kolima se realizuje potkolima koja se nazivaju izvori konstantne struje. Izvorima konstantne struje realizuje se znatno veća dinaimčka otpornost u odnosu na otpornost otpornika. Druga prednost izvora konstantne struje u odnosu na otpornike je u tome što zauzimaju manju površinu čipa.

Izvori konstatne struje su potkola (delovi kola) čija je funkcija da obezbede konstantnu vrednost struje u određenoj grani.



U jednosmernom režimu izvor konstantne struje se modelira jednosmernim strujnim generatorom I_o. Poželjno je da se vrednost struje koju daje izvor konstantne struje što manje menja usled promene napona ili temperature. U naizmeničnom režimu izvor konstantne struje se modelira dinamičkom otpornošću r_o . Nastoji se da vrednost dinamičke otpornosti bude što veća.

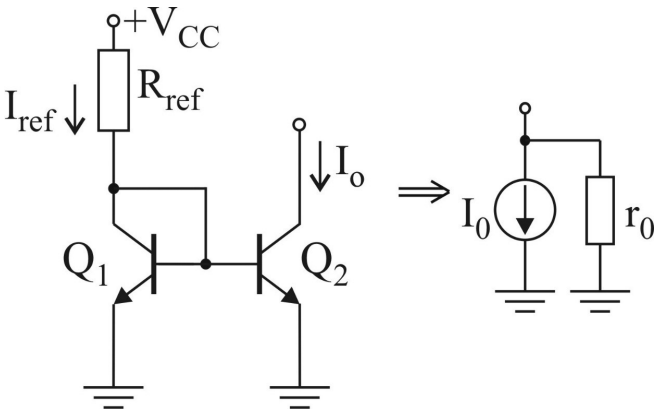
Pored ova dva parametra (I_o i r_o) za izvor konstantne struje je bitno i u kom opsegu može da se menja napon na spoljnjem priključku a da izvor konstantne struje održava struju konstantnom.

Izvori konstantne struje

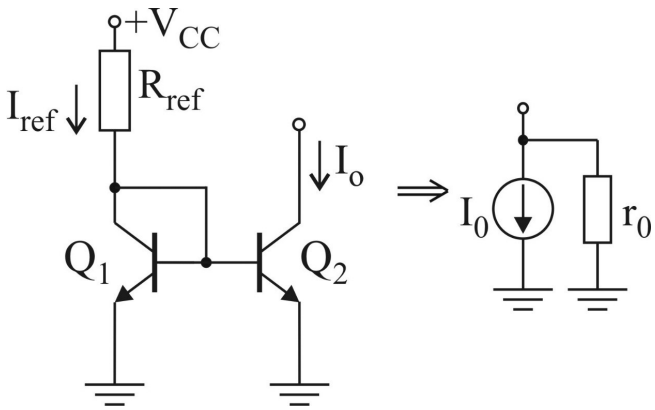
Najjednostavniji izvor konstantne struje je **strujno ogledalo** koje čine tranzistori Q_1 i Q_2. Ovo kolo praktično preslikava struju iz leve grane, $I_{C1} \approx I_{ref}$ u desnu granu $I_o = I_{C2}$.

Tranzistor Q_1 je vezan kao dioda (povezani su baza i kolektor) i radi u aktivnom režimu rada. S obzirom da kroz Q_1 protiče samo jednosmerna komponenta struje, možemo da smatramo da je napon na njegovom emitorskom pn spoju konstantan. Zato kažemo da je ovaj tranzistor izvor referentnog napona. Struja koja protiče kroz R_{ref} je približno konstntna i iznosi:

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



Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala

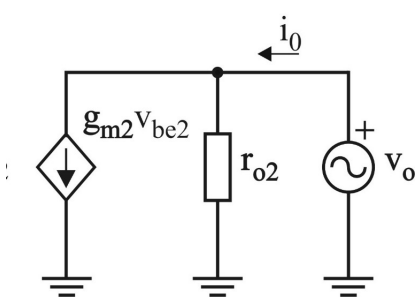


Tranzistori koji sačinjavaju strujno ogledalo su identičnih karakteristika.
S obzirom da struja kolektora prvenstveno zavisi od napona između baze i emitora a vrlo malo zavisi od napona između kolektora i emitora sledi da je jednosmerna struja izvora konstantne struje I_o približno jednaka referentnoj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

$$v_{BE1} = v_{BE} \quad \Rightarrow \quad I_{C1} \approx I_{C2} \qquad I_o = I_{C2} \approx I_{ref}$$

Da bi sagledali uticaj temperature na struju koju daje izvor konstantne struje potrebno je izraziti struju I_o u funkciji od parametara tranzistora.

$$I_{ref} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ref}} \qquad I_o = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{ref}$$



U naizmeničnom režimu rada naponi na emitorskim pn spojevima oba tranzistora su jednaki nuli. Odavde proizilazi da je izlazna otpornost ovog potkola jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora Q_2.

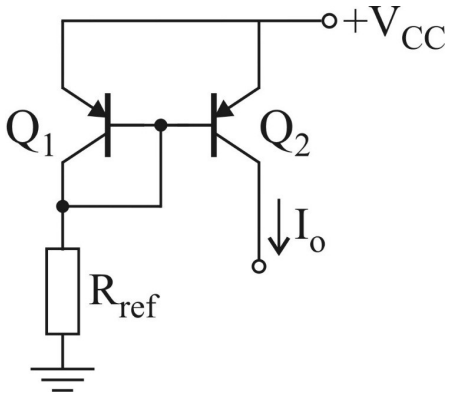
$$v_{be1} = v_{be2} = 0 \qquad r_o = \frac{v_o}{i_o} = r_{o2}$$

$$r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_{C2}}$$

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 strujni odvod (**current sink**). U jednosmernom režimu se dobijaju iste jednačine kao za current source.

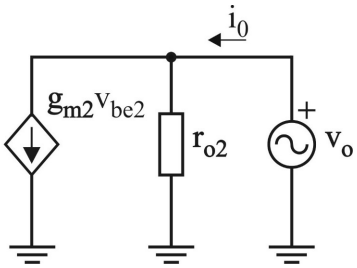


$$I_{ref} = \frac{V_{CC} + V_{BE}}{R_{ref}}$$

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

$$I_o \approx I_{ref}$$

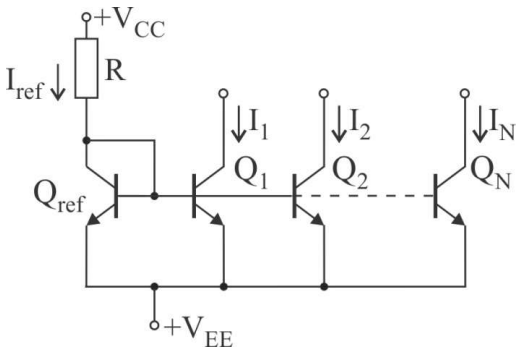
U naizmeničnom režimu dobija se:



$$v_{be1} = v_{be2} = 0 \qquad r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_{C2}}$$

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

Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala



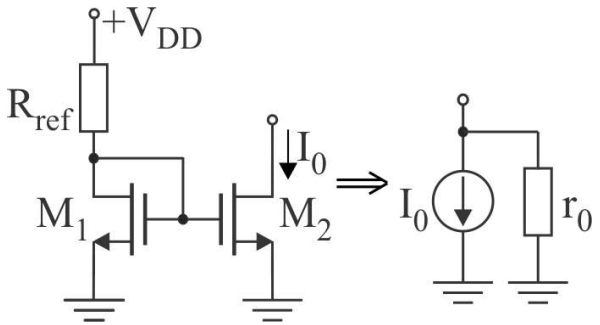
Tranzistor koji se koristi kao dioda (Q_{ref}) može da posluži kao **izvor referentnog napona** za više tranzistora u kolu istovremeno.

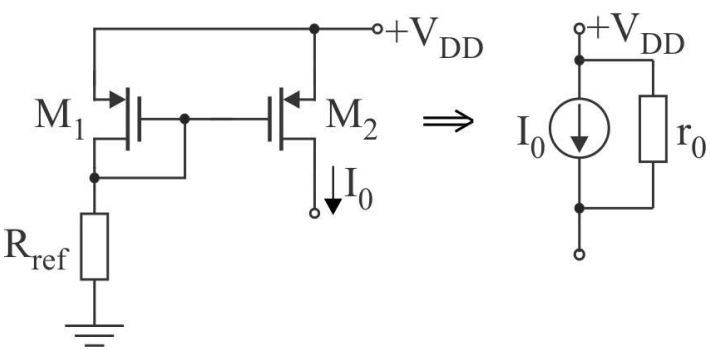
$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE} + V_{EE}}{R}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = \cdots = V_{BEN} \quad \Longrightarrow I_1 = I_2 = \cdots = I_N$$

Svi tranzistori koji čine izvor konstantne struje ($Q_1 - QN$) su identičnih karakteristika. Ukoliko je napon na emitorskom pn spoju, v_{BE}, isti kod svih tranzistora može da smatramo da su im struje kolektora približno jednake.

Izvor konstantne struje primenom strujnog ogledala realizovan MOSFET tranzistorima





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

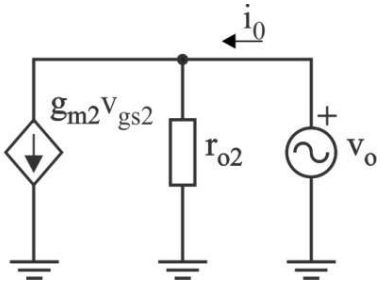
$$I_{D1} = A \cdot (V_{GS1} - V_{t1})^2$$

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

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 Vo zadovoljavaj 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:

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

Dinamičku otpornost određujemo u naizmeničnom režimu. Dinamička otpornost izvora konstantne struje r_o je jednaka izlaznoj otpornosti tranzistora M_2, r_{o2}.

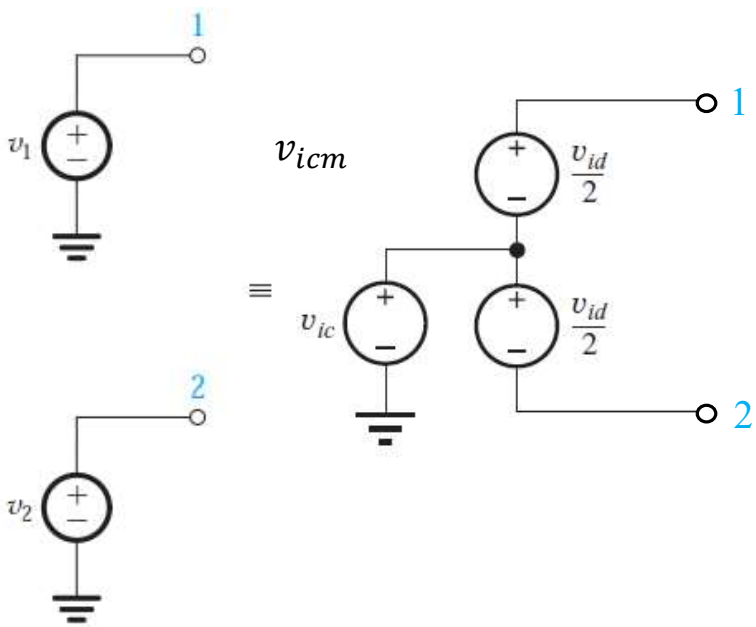


$$v_{gs1} = v_{gs2} = 0 \qquad r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_{D2}}$$

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

Diferencijalno pojačanje i pojačanje srednje vrednosti

Standardni pojačavač pojačava pored korisnog signala i šum, koji je uvek prisutan. Zbog toga se u elektronici široko koriste **pojačavači sa diferencijalnim ulazom**. Ovi pojačavači pojačavaju isključivo razliku signala dok se srednju vrednost signala koja sadrži šum oslabljuju. Bez diferencijalnog pojačanja, bilo bi nemoguće prenositi podatke na velike udaljenosti.



Naponi koji generišu dva naponska generatora, v_1 i v_2 mogu se izraziti preko:

srednje vrednosti napona v_{ICM} (*common mode voltage*) i

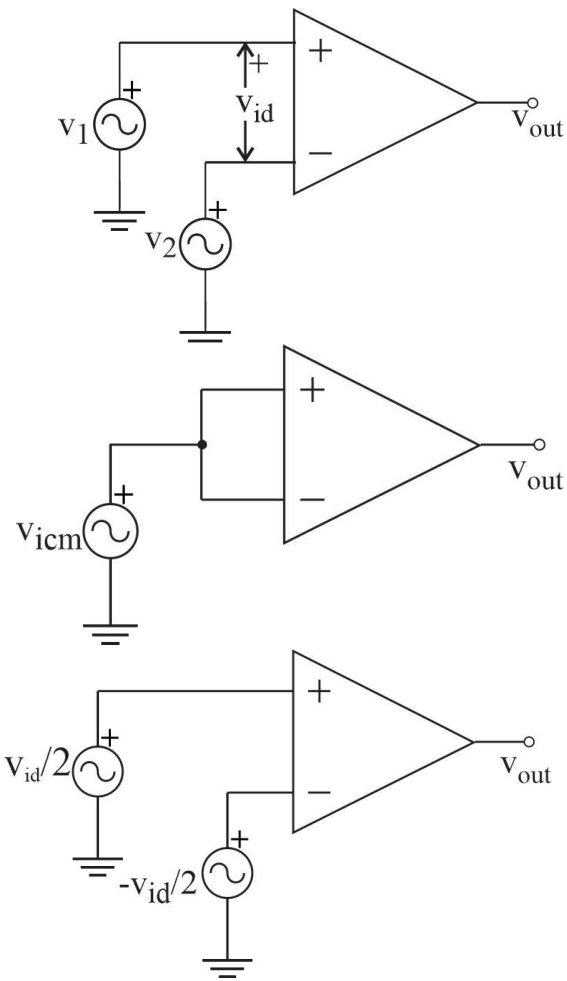
$$v_{icm} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

diferencijalnog napona v_{ID} (differential voltage)

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

$$v_1 = v_{icm} + \frac{v_{id}}{2} \qquad v_2 = v_{icm} - \frac{v_{id}}{2}$$

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_{icm} (dva identična generatora). Druga odgovara **asimetričnoj pobudi** kada deluje diferencijalni napon (dva generatora u protivfazi), $v_{id} = \frac{v_{id}}{2} - \left(-\frac{v_{id}}{2}\right)$.

$$A_{Cm} = \frac{v_{out}}{v_{icm}} = \left.\frac{v_{out}}{\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)}\right| v_1 = v_2$$

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

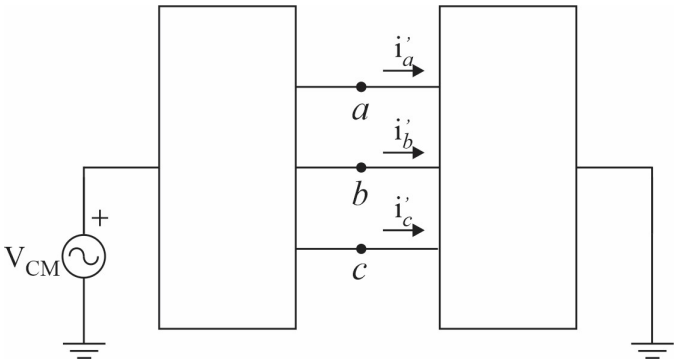
$$A_d = \frac{v_{ou}}{v_{id}} = \left.\frac{v_{out}}{v_1 - v_2}\right| v_1 = -v_2$$

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

$$v_{out} = A_d \cdot v_{id} + A_{cm} \cdot v_{icm}$$

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

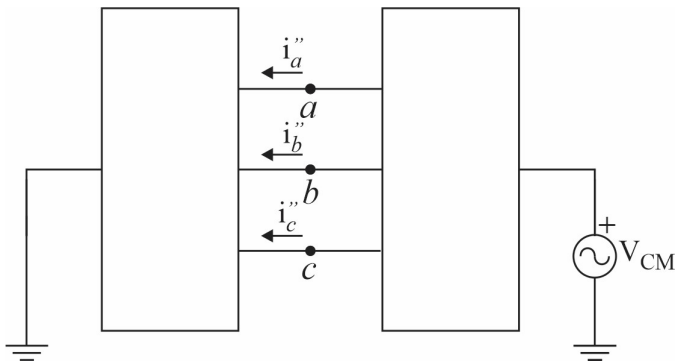
Bisekciona teorema



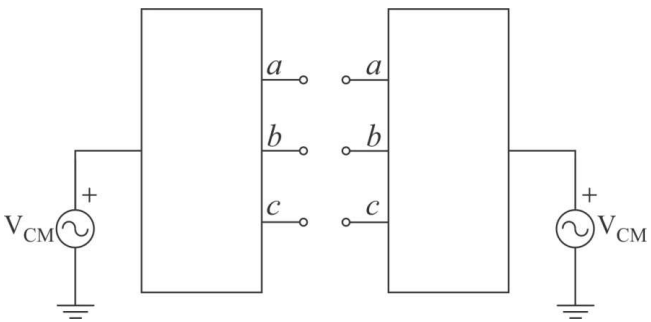
Bisekciona teorema odnosi se na kola koja su idealno simetrična Razmatramo prvo situaciju kada je **pobuda simetrična**, odnosno kada se kolo pobuđuje sa dva identična naponska generatora u obe polovine kola. Kada se primeni princip superpozicije (deluje svaki od generatora posebno) dobijamo dva identična kola, za čije struje će važiti: $i'_a = -i''_a$, $i'_b = -i''_b$, $i'_c = -i''_c$. Za struje koje protiču kroz grane koje povezju dva identična dela kola dobijamo prema principu superpozcije:

$$i'_a + i''_a = 0 \qquad i'_b + i''_b = 0 \qquad i'_c + i''_c = 0$$

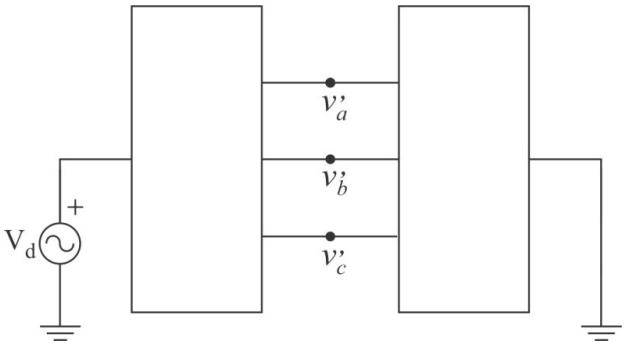
Zaključujemo da je rezultujuća struja kroz grane koje povezuju dva simetrična dela kola (a,b,c) jednaka nuli.



Kada je pobuda simetrična ($v_1 = v_2 = v_{cm}$) *tačke na liniji simetrije se zamenjuju prekidom.*



Bisekciona teorema

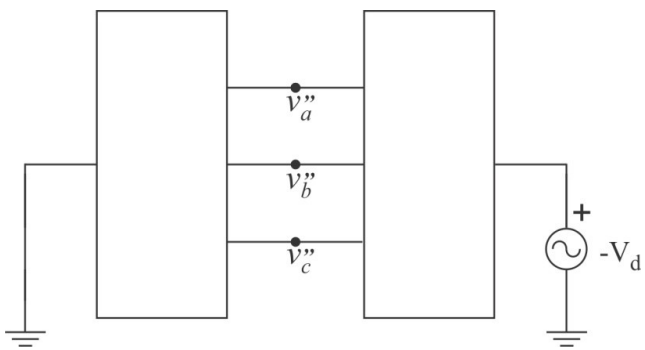


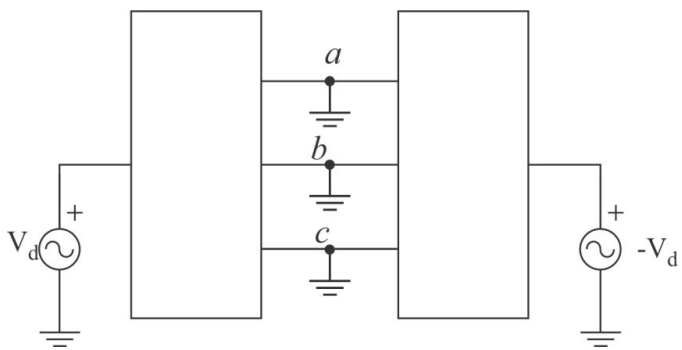
Razmatramo situaciju kada je **pobuda asimetrična**, odnosno kada se kolo pobuđuje se sa dva naponska generatora koji su jednaki po amplitudi i suprotnog znaka. Kada se primeni princip superpozicije dobiće se da je potencijal čvorova na liniji simetrije jednak nuli.

$$v'_a = -v''_a \quad v'_b = -v''_b \quad v'_c = -v''_c$$

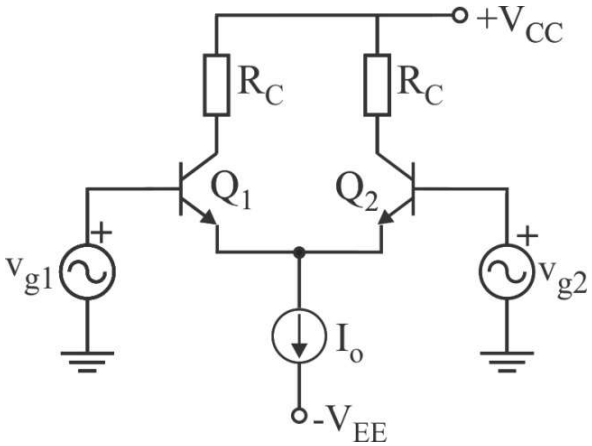
$$v'_a + v''_a = 0 \quad v'_b + v''_b = 0 \quad v'_c + v''_c = 0$$

Kada je pobuda asimetrična ($v_1 = -v_2 = v_d$) *tačke na liniji simetrije imaju potencijal nula, odnosno mogu se spojiti sa masom.*





Diferencijalni pojačavač



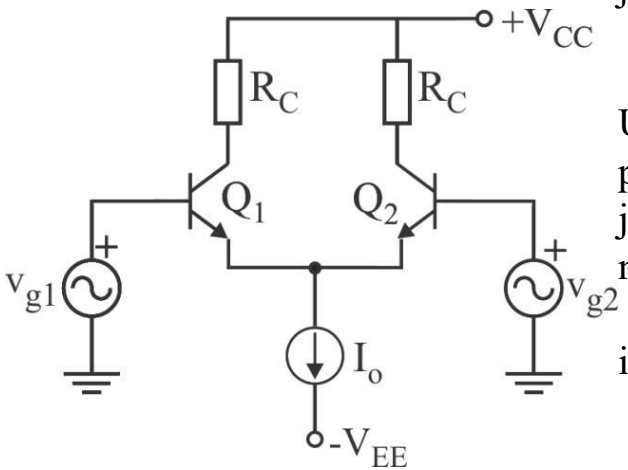
Funkcija diferencijalnog pojačavača je da pojača samo razliku ulaznih signala($v_{g1} - v_{g2}$). Diferencijalni pojačavač ima dva ulaza (na bazama tranzistora). Izlaz može biti simetričan (između kolektora tranzistora) ili asimetričan (izmedju kolektoru jednog tranzistora i mase).

Da bi diferencijalni pojačavač obavio funkciju za koju je namenje potrebno je da kolo bude simetričano, odnosno da karakteristike oba tranzistora (Q_1 i Q_2) budu identične i da otpornici u kolu kolektora, R_C, budu jednaki.

Diferencijalni pojačavač odlikuje mala osetljivost na priraštaj temperature. Ovaj pojačavač automatski kompenzuje sve promene u kolu, sem promena ulaznog signala.

S obzirom da je kolo simetrično, porast temperature prouzrokuje jednake promene struja u oba tranzistora diferencijalnog para. Sa druge strane zbir struja emitora tranzistora je konstantan i jednak struji izvora konstantne struje. Odavde sledi da ukoliko bi izvor konstantne struje bio idealan nebi se menjala struja usled promene temperature.

Diferencijalni pojačavač



Zbir struja tranzistora Q_1 i Q_2 ostaje uvek jednak struji izvora konstantne struje I_o. Kada je razlika ulaznih napona jednaka nuli struje kolektora oba tranzistora su jednake i iznose polovinu struje strujnog generatora Io/2.

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_o}{2}$$

Ukoliko postoji razlika ulaznih napona na jedanom od tranzistora pojaviće se pozitivni priraštaj struja a na drugom negativni priraštaj struje u odnosu na jednosmernu struju Io/2. Ovi priraštaji struja kolektora su naizmeničke komponente napona i_{c1}i i_{c2}. S obzirom da je zbir ukupnih struja kolektora konstantan i jednak:

$$i_{C1} + i_{C2} = I_o$$

i da se ove struje mogu izrazit kao:

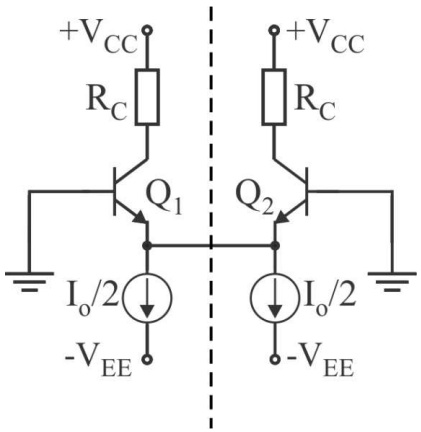
$$i_{C1} = I_{C1} + i_{c1}$$
$$i_{C2} = I_{C2} + i_{c2}$$

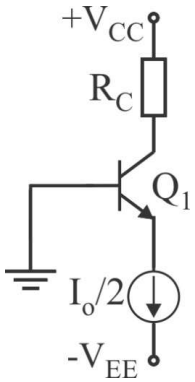
sledi da za naizmenične komponente struja važi:

$$i_{c1} = -i_{c2}$$

Zaključujemo da su naizmenične komponente struja tranzistora u diferencijalnom paru, Q_1 i Q_2 iste po apsolutnoj vrednosti. Pri malim priraštajima ulaznog napona (reda destak mV) možemo da smatramo da su promene struja u oba tranzistora linearno srazmerne ulaznom naponu.

Diferencijalni pojačavač





Jednosmerna analiza diferencijalnog pojačavača

Pri jednosmernoj analizi kolo je simetrično i može se primeniti bisekciona teorema. S obzirom da je u tom slučaju pobuda simetrična (dva identična naponska generatora V_{CC}) kolo se može podeliti duž ose simetrije i ta dva dela kola se mogu se nezavisno analizirati.

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I_o}{2}$$

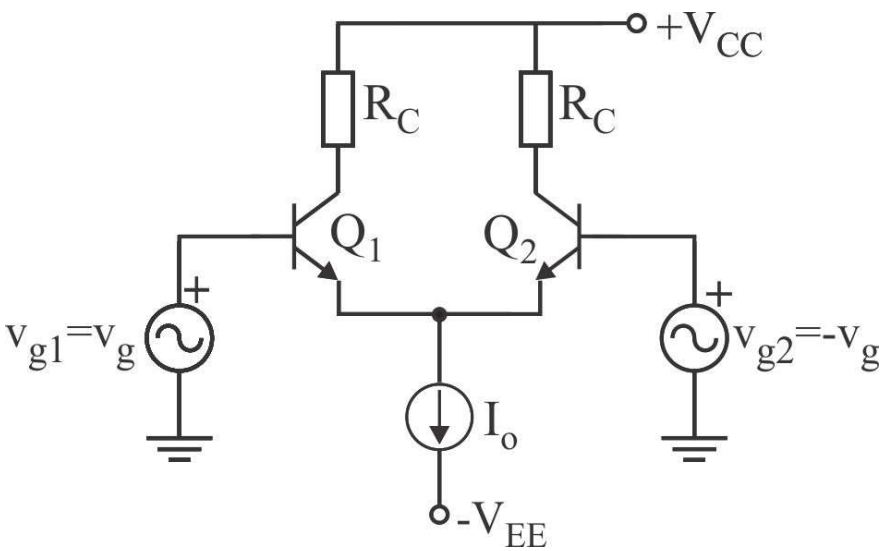
$$I_{C1} = I_{C2} = \beta \cdot I_B = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot I_E \approx \frac{I_o}{2}$$

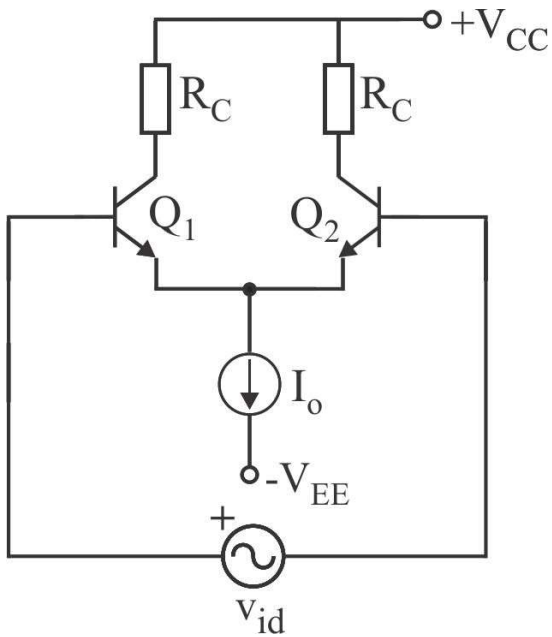
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - V_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot \frac{I_0}{2} + V_{BE}$$

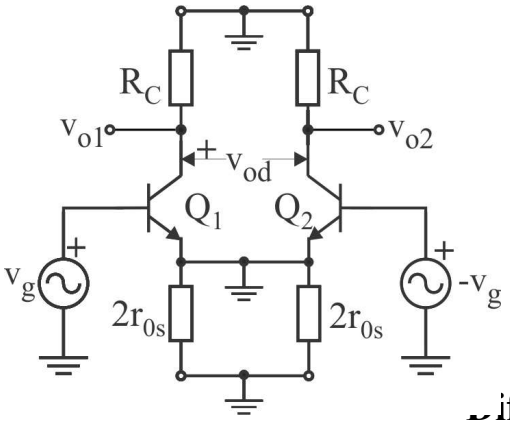
Diferencijalni pojačavač

Diferencijalno pojačanje određujemo pri asimetričnoj pobudi, odnosno kada su ulazni naponi jednaki po amplitudi a suprotnog znaka $v_{g1} = -v_{g2} = v_g$.
Diferencijalni napon je: $v_{id} = v_{g1} - v_{g2} = 2 \cdot v_g$





Diferencijalni pojačavač



Diferencijalno pojačanje

Kada se primeni bisekciona teorema za kolo sa asimetričnom pobudom dobija se kolo koje odgovara šemi pojačavača sa zajedničkim emitorom. Iz ovog kola dobija se:

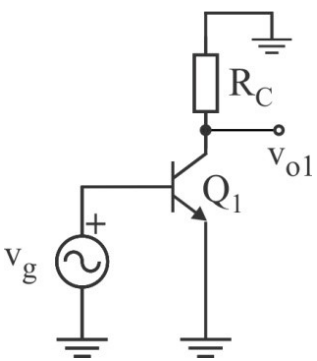
$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} = -g_m \cdot R_C || r_o \cdot v_g = -g_m \cdot R_C || r_o \cdot \frac{v_{id}}{2}$$

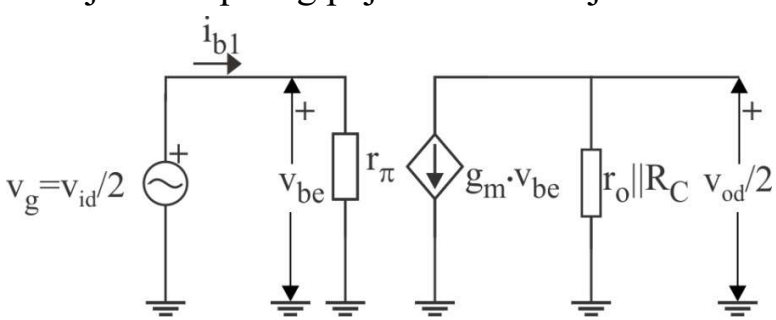
Diferencijalno pojačanje kada je izlaz asimetričan, odnosno kada je izlaz na kolektoru jednog od tranzistora (v_{o1} ili v_{o2}).

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

Diferencijalno pojačanje kada je izlaz simetričan, odnosno između kolektora tranzistora ($v_{od} = v_{o1} - v_o2$). Ovo pojačanje ima istu vrednost kao pojačanje jednostepenog pojačavača sa zajedničkim emitorom.

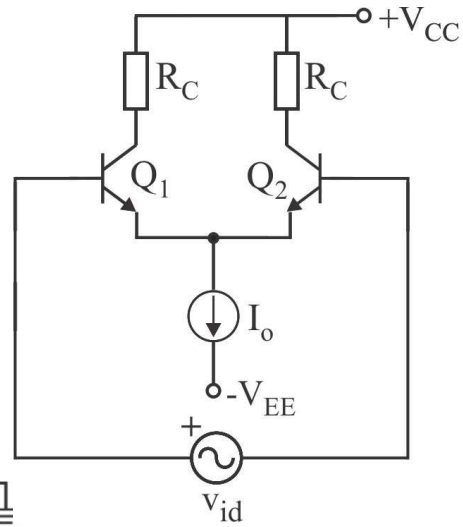
$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}}\bigg|_{v_{g1} = -v_{g2}} \approx -g_m \cdot R_C$$





Diferencijalni pojačavač

Diferencijalna ulazna otpornost

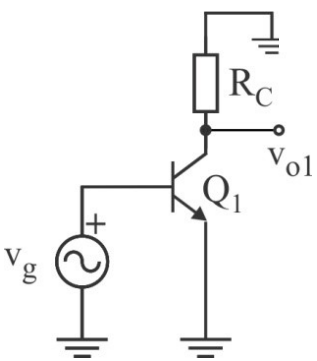


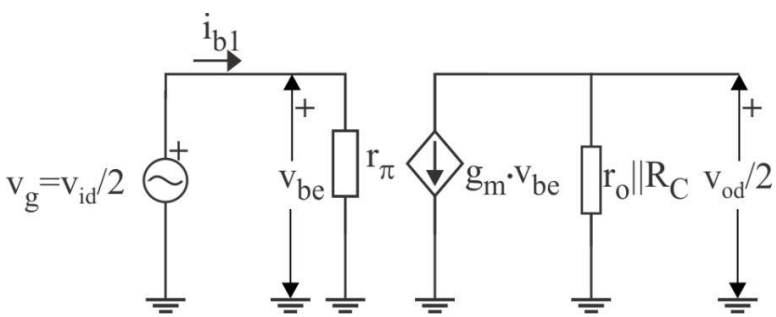
Ulaznu otpornost diferencijalnog pojačavača pri asimetričnoj pobudi R_{id} možemo odrediti iz kola dobijenog primenom bisekcione teoreome. Iz ovog kola sledi:

$$\frac{v_{id}}{2} = i_{b1} \cdot r_\pi \qquad -\frac{v_{id}}{2} = i_{b2} \cdot r_\pi$$

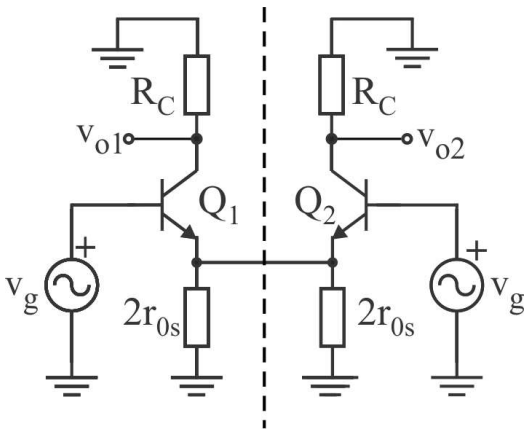
Kako je $i_{in} = i_{b1} = -i_{b2}$, sledi :

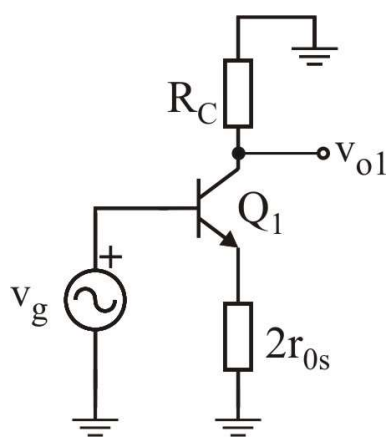
$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{b1}} = 2 \cdot r_\pi$$





Diferencijalni pojačavač

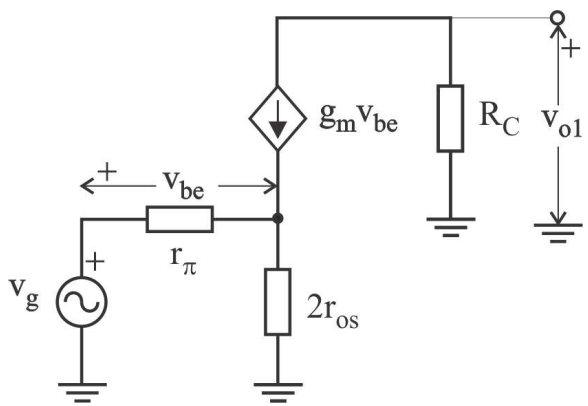




Pojačanje srednje vrednosti

Pojačanje srednje vrednosti signala AC određuje se pri simetričnoj pobudi, odnosno kada su pobudni generatori identični $v_{g1} = v_{g2} = v_g$. Izvor konstante struje se u naizmeničnom režimu zamenjuje dinamičkom otpornošću r_{os}.

$$A_C = \frac{v_{o1}}{\left(\frac{v_{g1}+v_{g2}}{2}\right)}\Bigg|_{v_{g1}=v_{g2}} = \frac{v_{o1}}{v_g}$$



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

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

$$v_{o1} = -R_C \cdot g_m \cdot v_{be}$$

$$A_C = \frac{v_{o1}}{v_g} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m\right) \cdot 2 \cdot r_{os}}$$

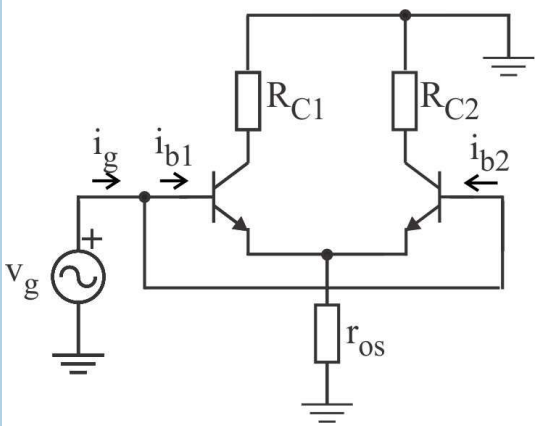
S obzirom da je $g_m = \frac{\beta}{r_{pi}} \gg \frac{1}{r_{pi}}$

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

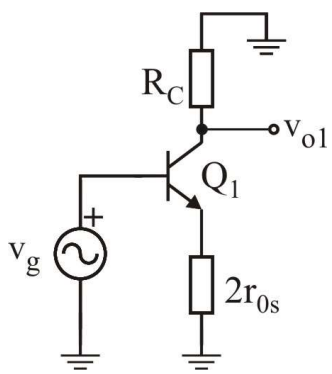
$$A_c \approx -\frac{R_C}{2 \cdot r_{os}}$$

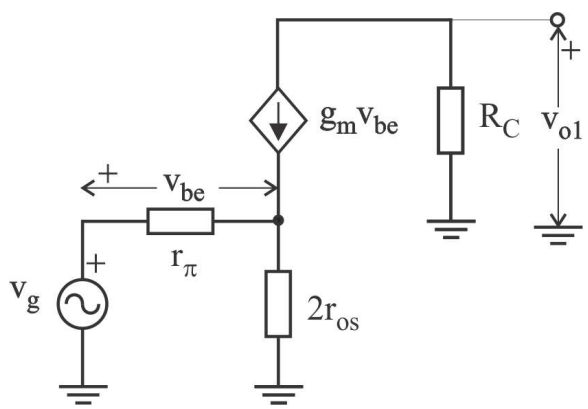
Diferencijalni pojačavač

Ulazna otpornost za srednju vrednost signala



Ulaznu otpornost diferencijalnog pojačavača pri simetričnoj pobudi R_{ic} određujemo kao i pojačanje iz kola dobijenog primenom bisekcione teoreome.





$$v_g = r_\pi i_{b1} + 2r_{os} \cdot (\beta + 1) i_{b1}$$

$$i_{b1} = \frac{v_g}{r_\pi + 2r_{os}(\beta + 1)}$$

$$i_g = i_{b1} + i_{b2} = 2i_{b1}$$

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

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

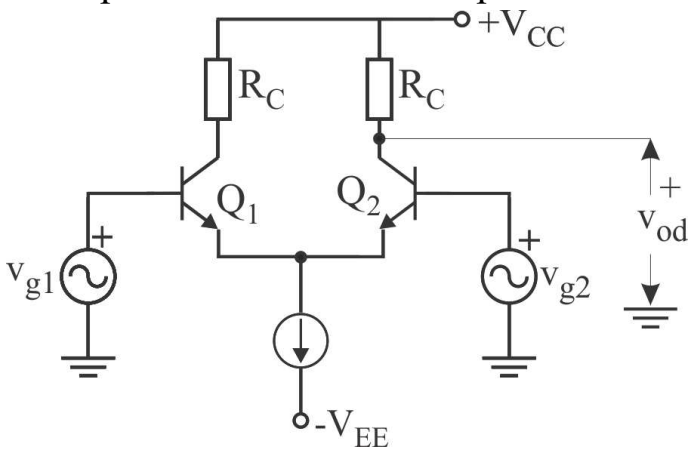
Diferencijalni pojačavač

Merilo kvaliteta diferencijalnog pojačavača je **faktor potiskivanja (CMRR – *common mode rejection ratio*)** koji predstavlja apsolutnu vrednost odnos diferencijalnog pojačanja i pojačanja srednje vrednosti. Što je veća vrednost faktora potiskivanja diferencijalni pojačavač je kvalitetniji.

$$CMRR = \left|\frac{A_d}{A_c}\right|$$

Difrencijalni 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 približno jednak proizvodu dinamičke otpornosti izvora konstantne struje i transkonduktanse tranzistora.



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

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

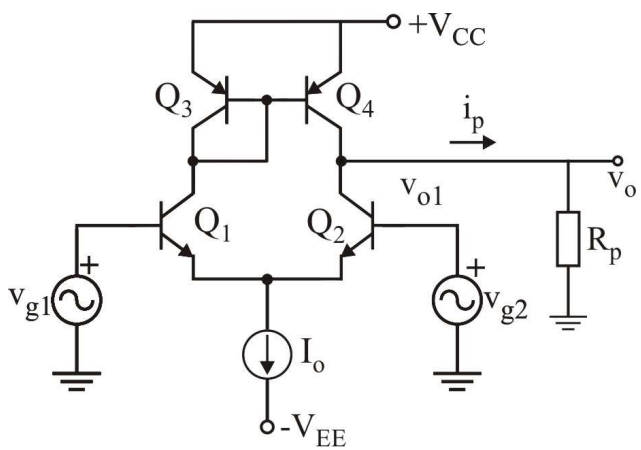
r_{os} je dinamička otpornost izvora konstantne struje
g_m je transkonduktansa tranzistora u diferencijalnom paru (Q_1 i Q_2)

Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem

U integrisanoj tehnologiji umesto kolektorskih otpornika koristi se strujno ogledalo. Tranzistori koji čine strujno ogledalo Q_3 i Q_4 čine takozvano **aktivno opterećenje**. Strujno ogledalo preslikava struju kolektora tranzistora Q_3 u struju kolektora tranzistora Q_4 tako da je izlazna struja, i_p, jednaka razlici struja kolektora tranzistora u diferencijalnom paru Q_1 i Q_2.

$$v_{BE3} = v_{BE4} \implies i_{c3} = i_{c4}$$

$$i_{C1} = i_{C3} + i_{B3} + i_{B4} \approx i_{C3}$$



Izlazna struja, i_p, jednaka razlici struja kolektora tranzistora u diferencijalnom paru Q_1 i Q_2:

$$i_p = i_{c4} - i_{c2} = i_{c1} - i_{c2}$$

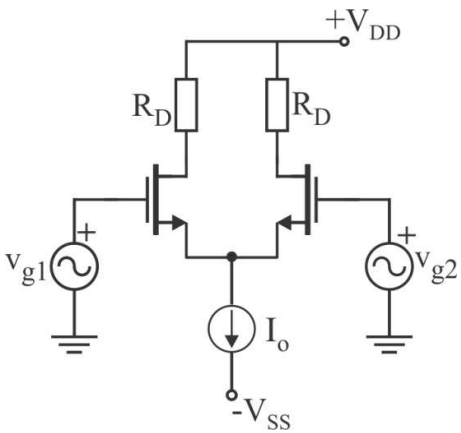
$$i_p = i_{c1} - i_{c2} = g_m \cdot v_{g1} - g_m \cdot v_{g2} = g_m(v_{g1} - v_{g2})$$

$$v_o = i_p R_p$$

$$A_d = \frac{v_o}{v_d} = \frac{v_o}{v_{g1} - v_{g2}}\bigg|_{v_{g1} = -v_{g2}} = g_m \cdot R_p$$

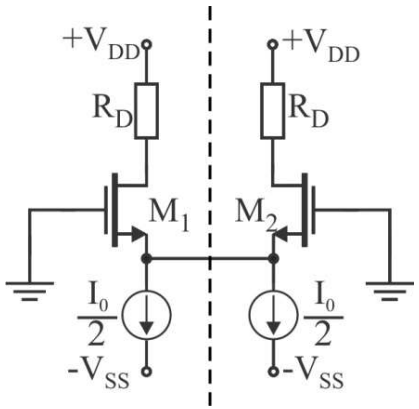
Kolo ima asimetričan izlaz i pojačanje isto kao diferencijalni pojačavač sa simetričnim izlazom (izlazom izmedju kolektora tranzistora).

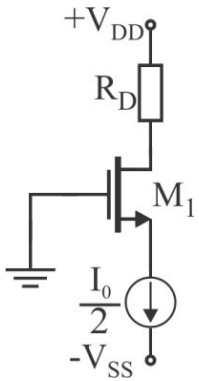
Diferencijalni pojačavač



Polarizacija diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima

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





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

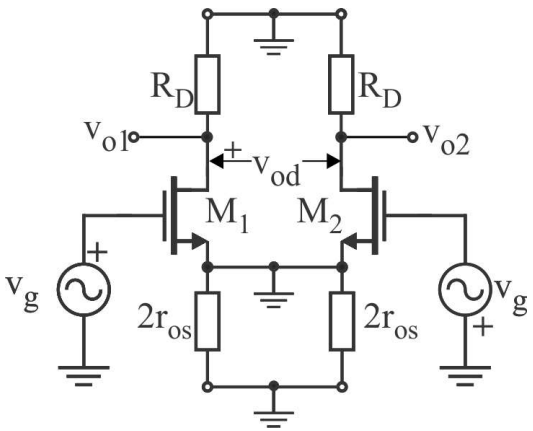
$$V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_o}{2A}}$$

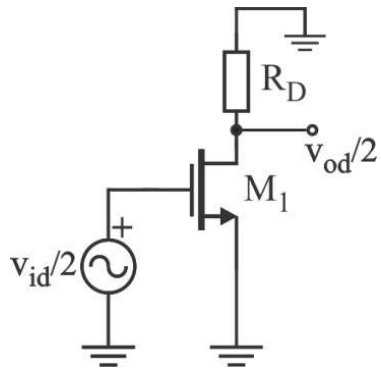
$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$

Diferencijalni pojačavač

Diferencijalno pojačanje

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





$$v_{o1} = -g_m \cdot v_{gs1} \cdot r_o \parallel R_D$$

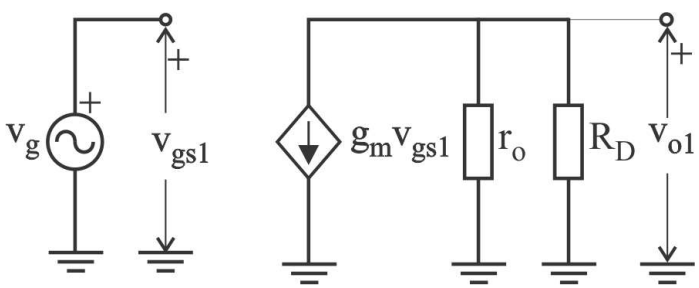
$$v_{gs} = v_g = \frac{v_{id}}{2} \qquad v_{od} = v_{o1} - v_{o2} = 2 \cdot v_{o1}$$

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

jer je $r_0 \gg R_D$

Difrerencijalno pojačanje kada je izlaz simetričan, odnosno između drejnova tranzistora (v_{od}).

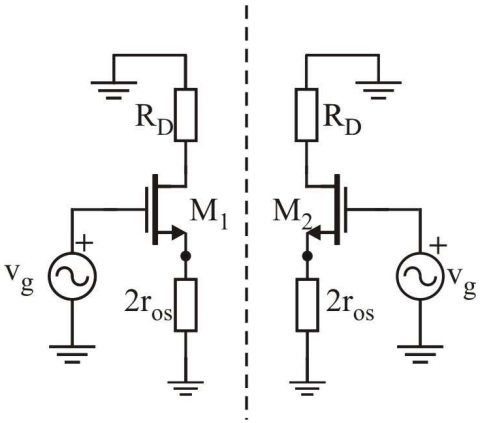
$$A_d = \left.\frac{v_{od}}{v_{id}}\right|_{v_{g1} = -v_{g2}} = -g_m \cdot R_D$$



Diferencijalno pojačanje kada je izlaz asimetričan, odnosno na drejnu jednog od tranzistora (v_{o1}).

$$A_d = \left.\frac{v_{o1}}{v_{id}}\right|_{v_{g1} = -v_{g2}} = -\frac{g_m \cdot R_D}{2}$$

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.

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

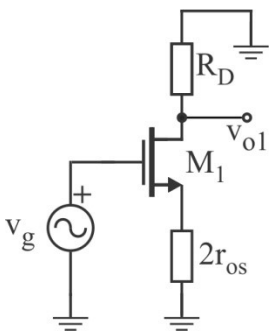
$$v_{oc} = -R_d \cdot i_d = -R_d \cdot g_m \cdot v_{gs}$$

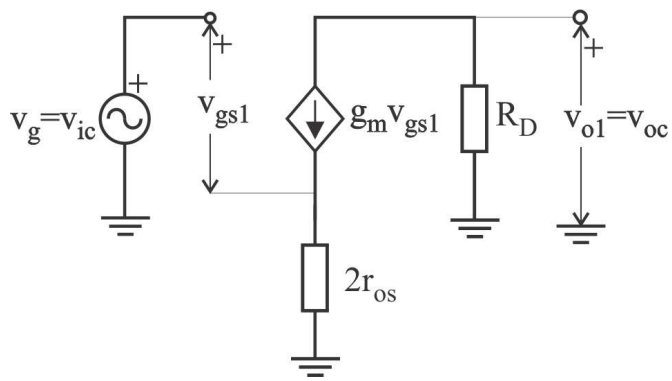
$$v_{oc} = v_{ic} \cdot \left[\frac{-g_m \cdot R_D}{1 + 2 \cdot g_m \cdot r_{os}}\right]$$

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

$$g_m \cdot r_{os} \gg 1$$

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

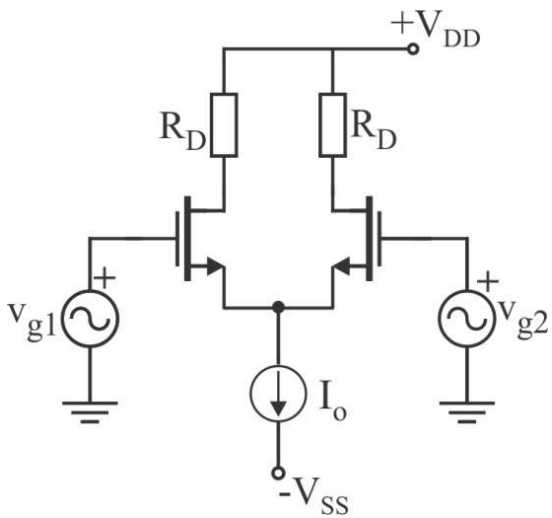




Diferencijalni pojačavač

Difrencijalni 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 prouzrokovaće pojačanje srednje vrednosti različito od nule. U praksi uvek postoje razlike u parametrima komponenata diferencijalnog pojačavača.



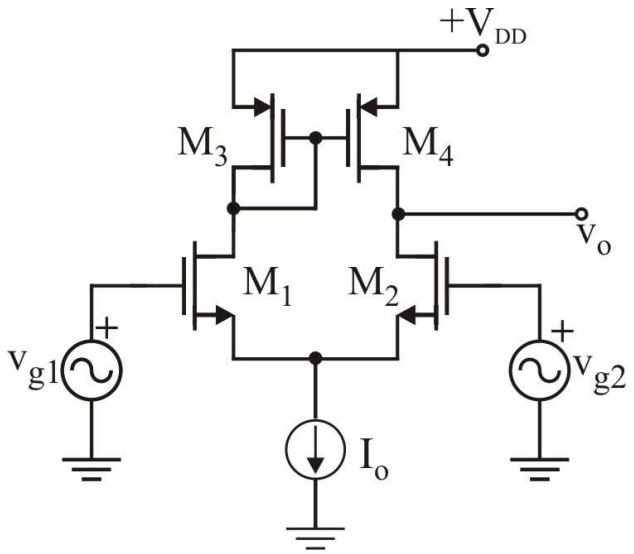
$$A_d = -\frac{g_m \cdot R_D}{2}$$

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

$$CMRR = \left|\frac{A_d}{A_C}\right| = g_m \cdot r_{os}$$

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

Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem



U integrisanoj tehnologiji se umesto otpornika kao opterećenje koristi strujno ogledalo (p-kanalni tranzistori M_3 i M_4). Strujno ogledalo preslikava struju drejna tranzistora M_3 u struju drejna tranzistora M_4. Izlazna struja jednaka je razlici struja tranzistora u diferencijalnom paru M1 i M2. Tranzistori koji čine strujno ogledalo M3 i M4 čine takozvano **aktivno opterećenje**. Ovo kolo naziva se **CMOS diferencijalni pojačavač**.

Osnovna pitanja

1. **Električna šema i diferencijalno pojačanje diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorom. (13,16,17).**
2. **Pojačanje srednje vrednosti i faktor potiskivanja diferencijalnog pojačavača sa bipolarnim tranzistorom (19,21).**

Ostala ispitna pitanja

1. **Srednja vrednost signala i diferencijalni signal, pojačanje srednje vrednosti i diferencijalno pojačanje (9,10)**
2. **Bisekciona teorema (11,12).**
3. **Izvor konstantne struje realizovan strujnim ogledalom (kolo sa bipolarnim tranzistorima) (4,5).**
4. **Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem (22).**
5. **Diferencijalno pojačanje, pojačanje srednje vrednosti i faktor potiskivanja diferencijalnog pojačavača sa MOSFET tranzistorima (24,25,26).**