Operacioni pojačavači

Definicija operacionog pojačavača

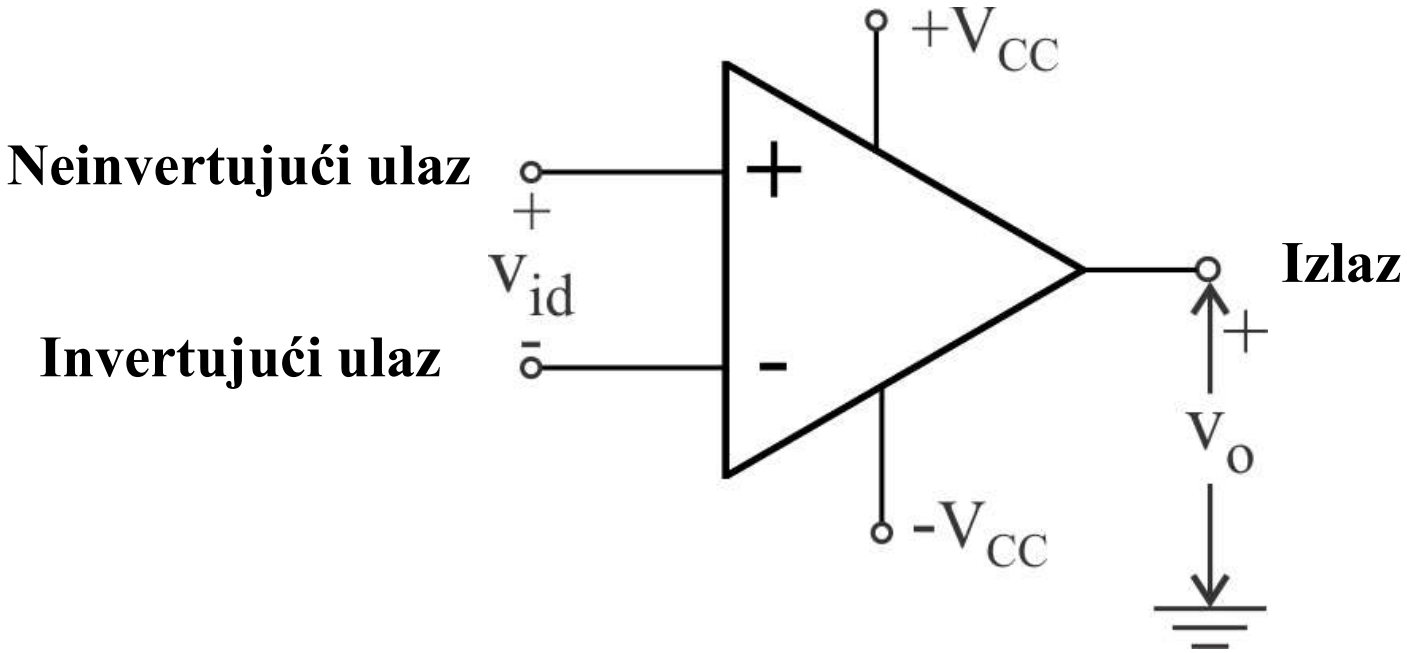
- Definicija: **Operacioni pojačavač** je kolo sa direktnom spregom koje obavlja **funkciju naponskog generatora kontrolisanog diferencijalnim naponom**.

- Operacioni pojačavač se izrađuje u integrisanoj tehnici, tako da se često prilikom analize tretirati kao jedna komponenta iako predstavlja kolo. Operacioni pojačavač je najšire rasprostranjeno analogno integrisano kolo.

- Operacioni pojačavač se koristi za realizaciju brojnih i raznovrsnih elektronskih kola sa različitim funkcijama. Principijelan rad ovih kola se može najbolje razumeti kada se smatra da operacioni pojačavač ima idealne karakteristike.

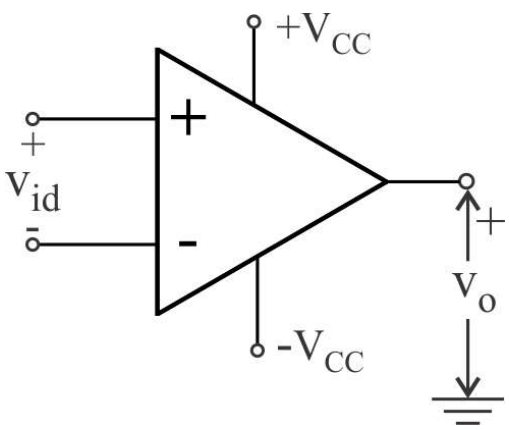
Simbol operacionog pojačavača

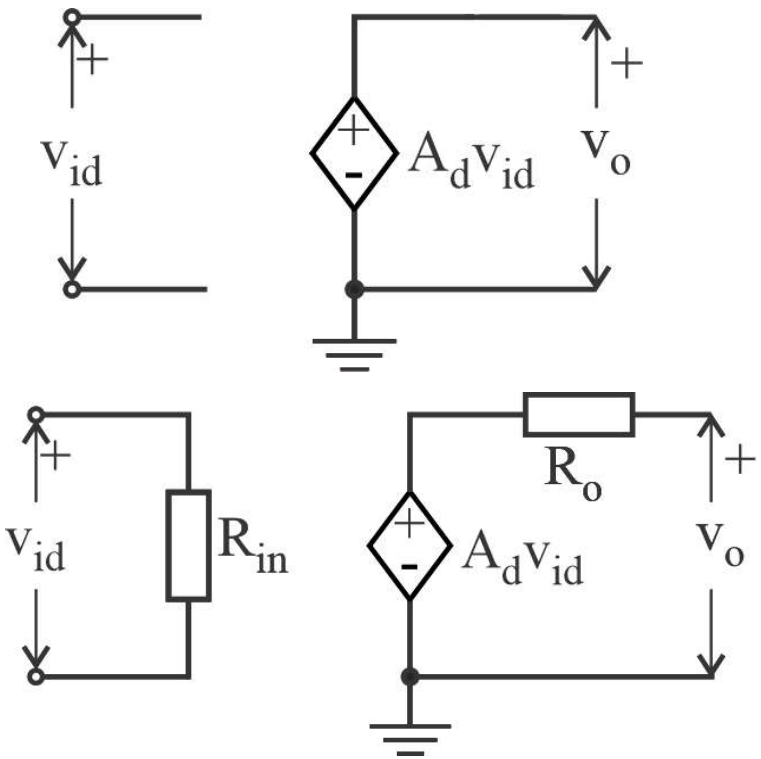
- Operacioni pojačavač ima **simetričan ulaz** i **nesimetričan izlaz**. To znači da se izlazni napon, v_o, meri od izlaznog priključka prema masi.
- Ulazi su označen simbolima: **+** za **neinvertujući ulaz** i **–** za **invertujući ulaz**. Ulazni napon se meri od neinvertujućeg do invertujućeg ulaza. Znak + na ulazu označava da su ulazni i izlazni napon u fazi (pozitivno pojačanje). Znak minus na ulazu označava da je izlazni napon fazno pomeren u odnosu na ulazni za 180^0 (negativno pojačanje). Ponekad se pored dva ulazna priključka i izlaznog priključka prikazuju i priključci za polarizaciju kola na koje se povezuje napajanje (+VCC, -VCC).



Model (ekvivalentno kolo) operacionog pojačavača

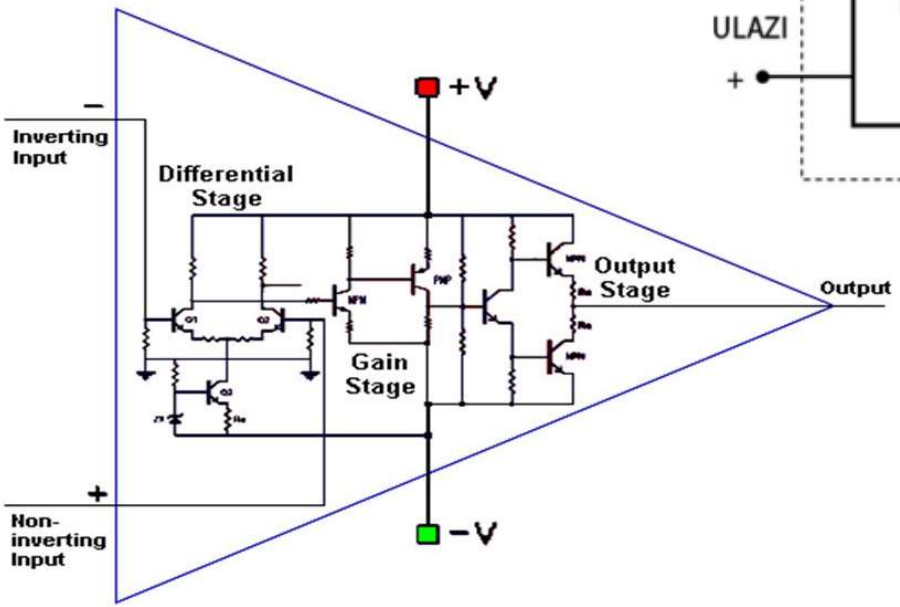
- Idealni operacioni pojačavač ima:
  - Beskonačnu ulaznu otpornost R_{in},
  - Nultu izlaznu otpornost Ro,
  - Beskonačno diferencijalno pojačanje A_d.
- Najjednostavniji model realnog operacionog pojačavača opisan je sa konačnim diferencijalnim pojačanje A_d, beskonačnom ulaznom otpornošću između ulaza R_{in}, kao i nultnom izlaznom otpornošću R_o (gornja slika). Ukoliko se uzmu u obzir ulazna otpornost i izlazna otpornost dobija se precizniji model (donja slika).

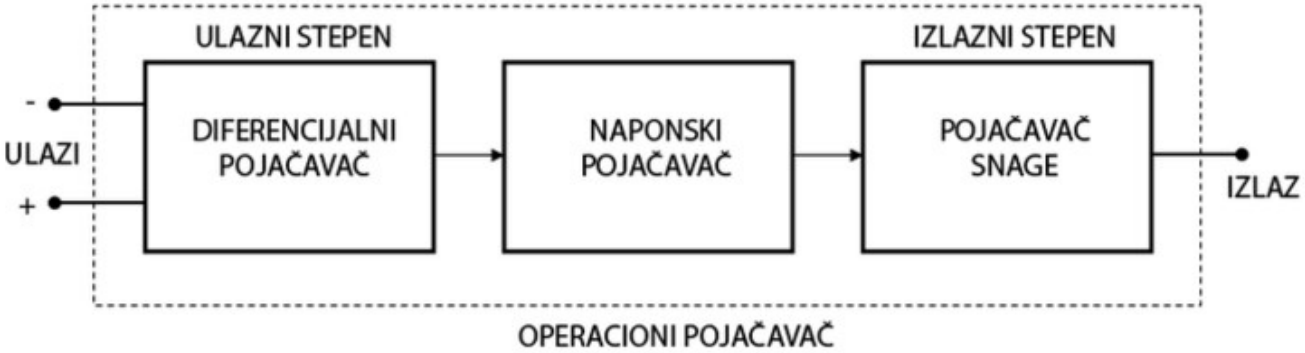




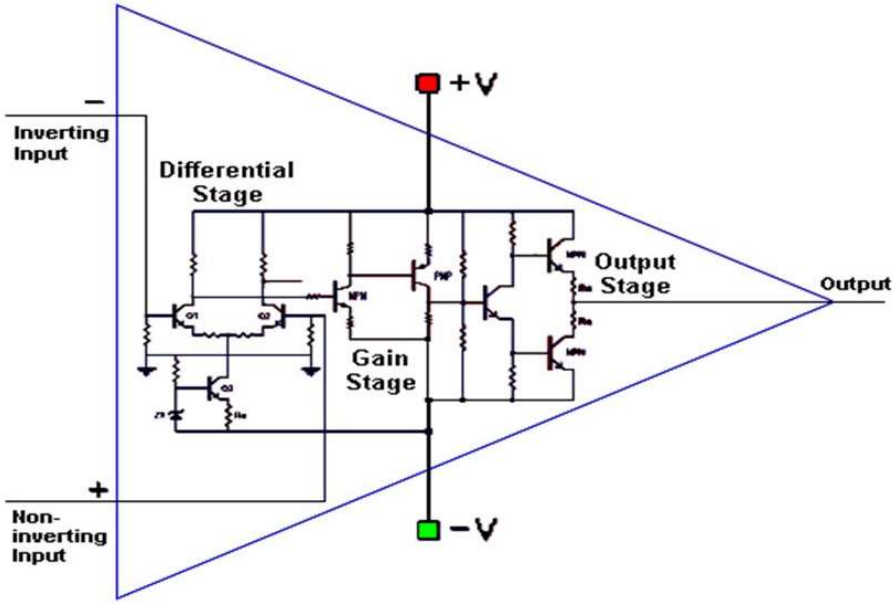
Struktura operacionog pojačavača

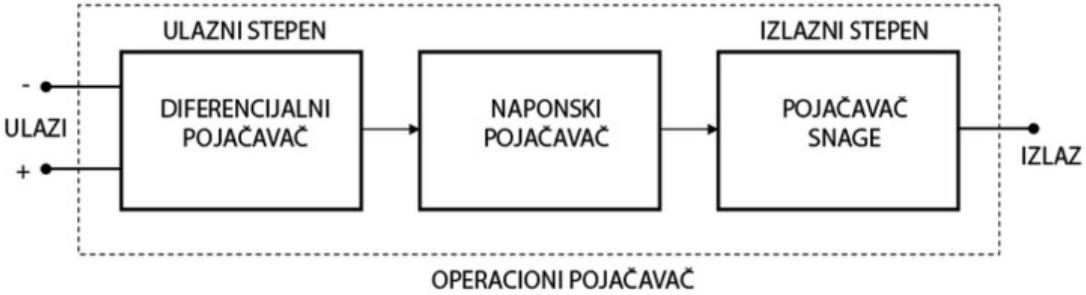
- Operacioni pojačavač sadrži tri stepena:
  - Diferencijalni pojačavač (ulazni stepen)
  - Naponski pojačavač
  - Pojačavač snage (izlazni stepen)
- Funkcija diferencijalnog pojačavača je da potisne srednju vrednost signala i obezbedi veliku vrednost ulazne otpornosti. Naponski pojačavač ima funkciju da obezbedi dovoljnu vrednost naponskog pojačanja. Izlazni stepen služi da obezbedi malu izlaznu otpornost i pojačanje snage.

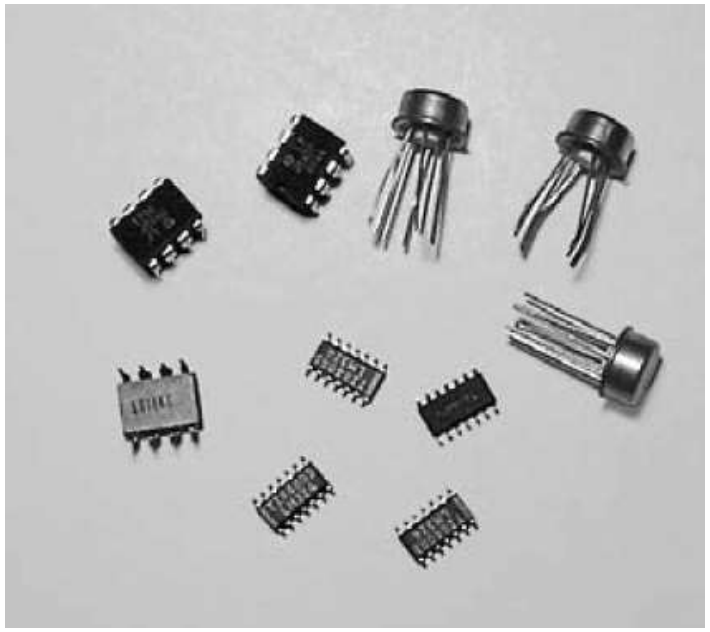




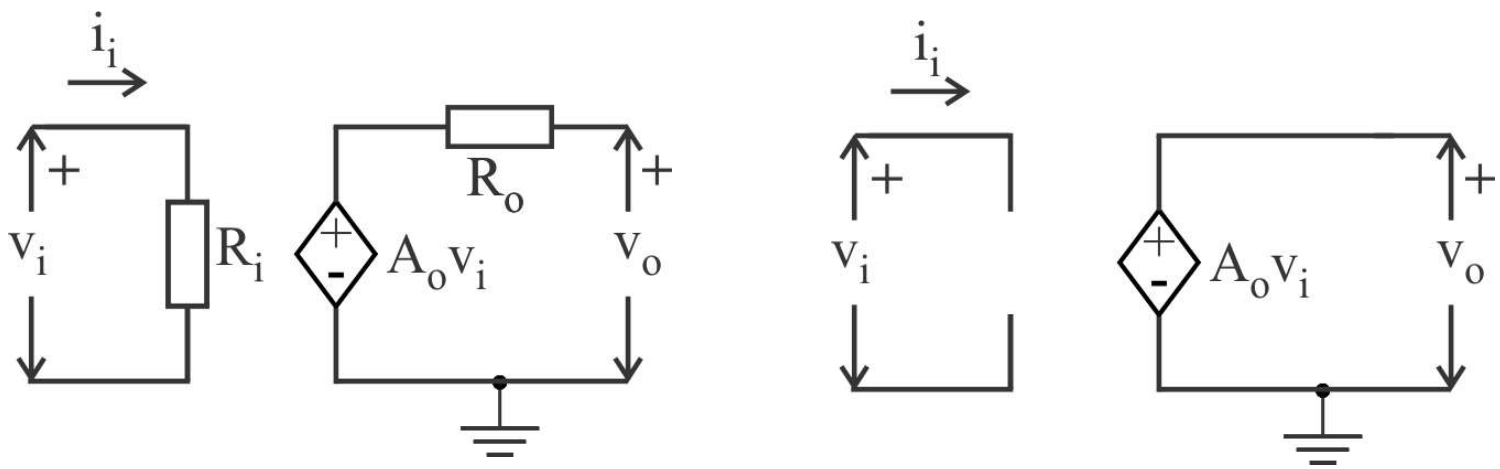
Struktura operacionog pojačavača







Operacioni pojačavač po karakteristikama odgovara idealnom naponskom pojačavaču sa simetričnim ulaznom

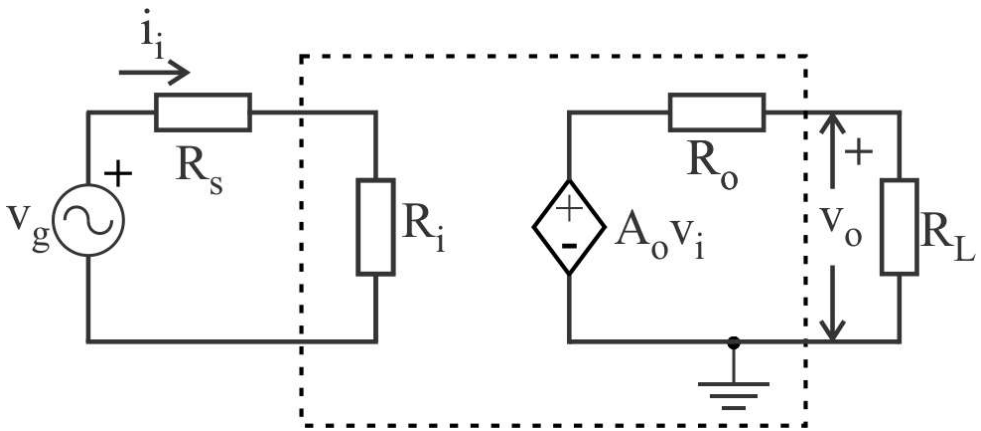


Idealni naponski pojačavač ima beskonačno veliku ulaznu otpornost i nultu izlaznu otpornost. Na taj način dobija se maksimalna vrednost naponskog pojačanja, jer nema smanjenja napona ni na ulaznom ni na izlaznom pristupu.

$$R_i = \infty \qquad R_o = \mathbf{0}$$

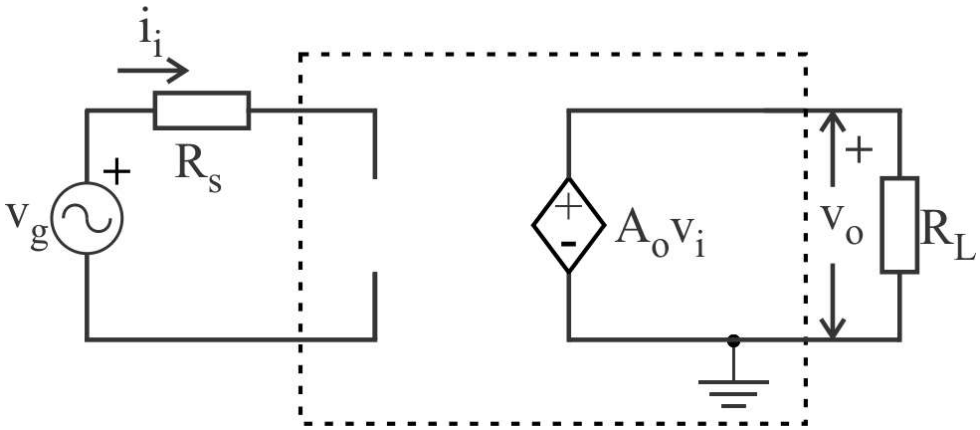
Operacioni pojačavač po karakteristikama odgovara idealnom naponskom pojačavaču sa simetričnim ulaznom

Realni naponski pojačavač



$$A_n = \frac{v_o}{v_g} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot A_o \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

Idealni naponski pojačavač



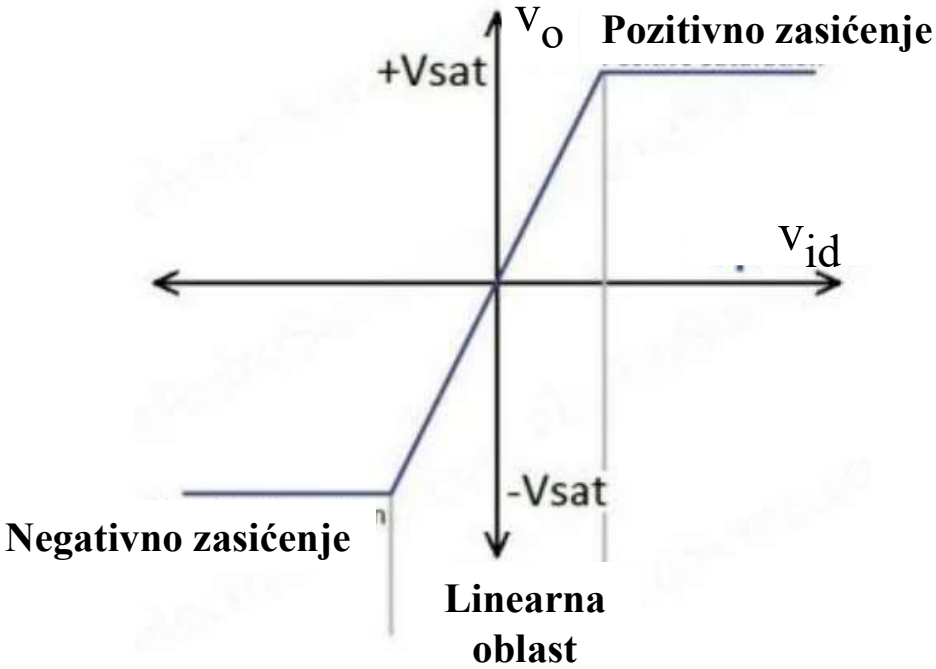
$$R_i = \infty \qquad R_o = 0$$

$$A_n = \frac{v_o}{v_g} = A_o$$

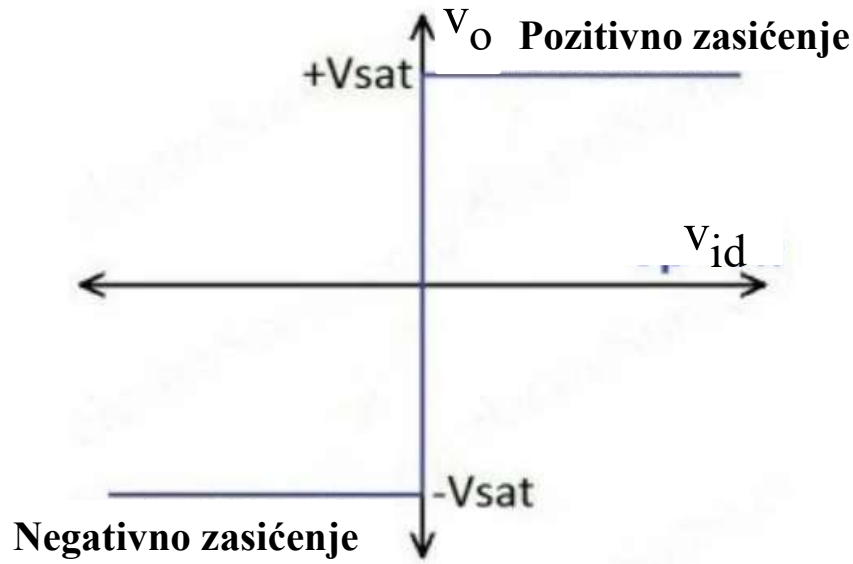
Naponsko pojačanje idealnog naponskog pojačavača ne zavisi od otpornosti pobudnog generatora R_S, niti od otpornosti potrošača, R_L.

Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

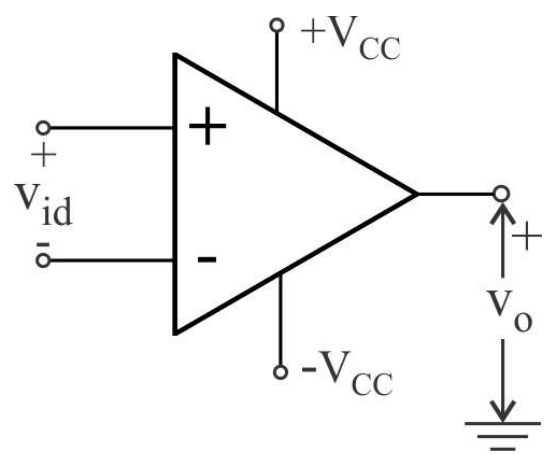


Prenosna karakteristika realnog O.P.



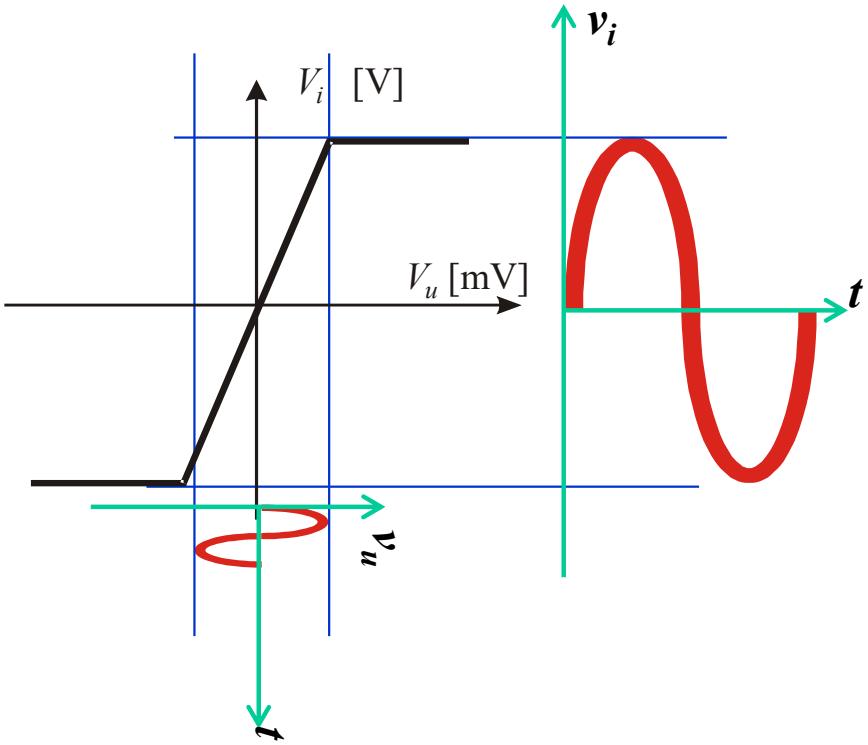
Prenosna karakteristika idealnog O.P.

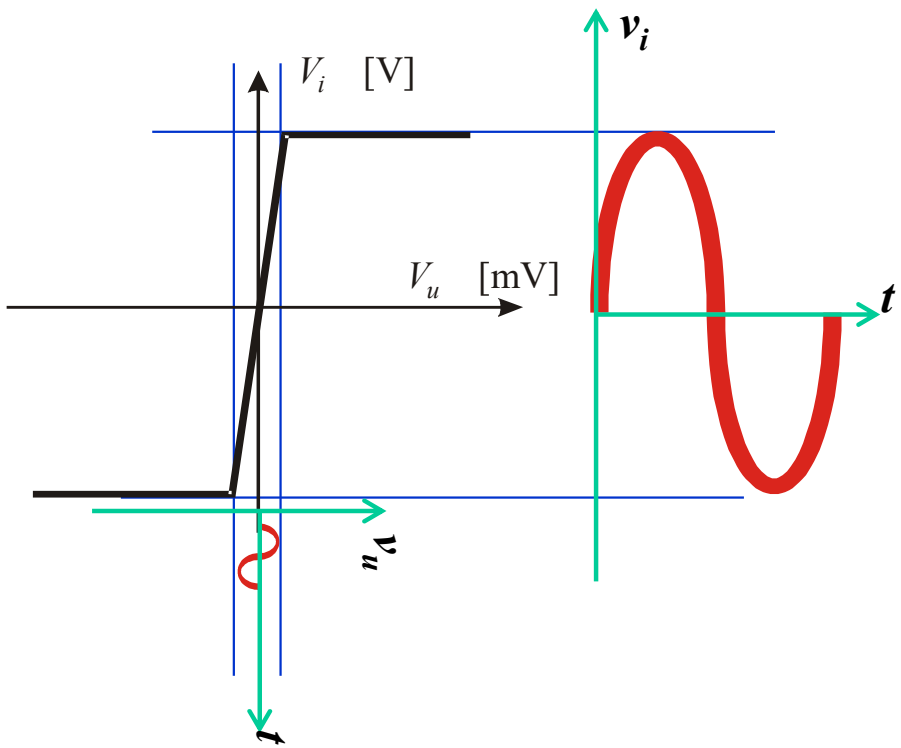
U prenosnoj karakteristici operacionog pojačavača mogu se uočiti tri linearna segnementa: **negativno zasićenje**, **pozitivno zasićenje** i **linearna oblast**. U analognim kolima O.P. radi u linearnoj oblasti a u digitalnim kolima u pozitivnom ili negativnom zasićenju.



Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

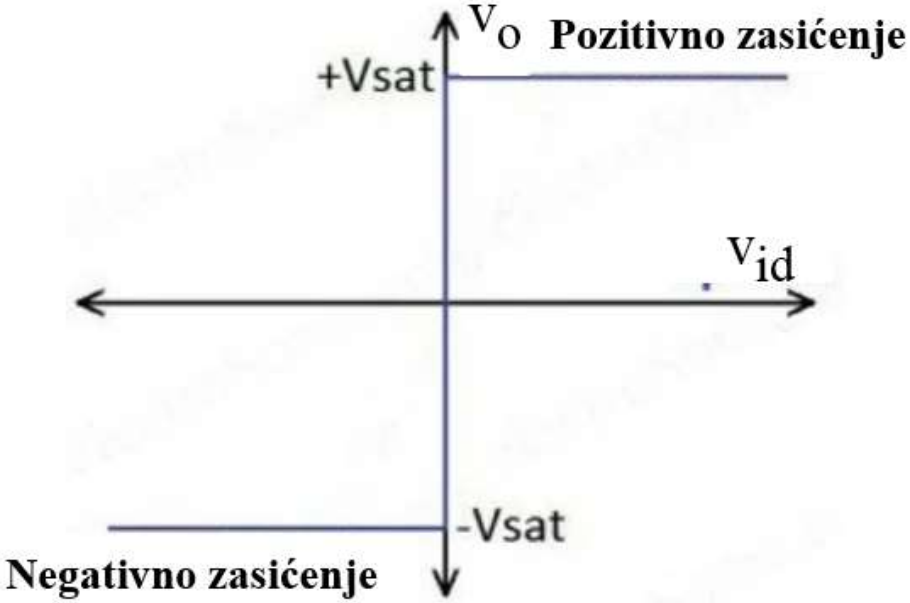


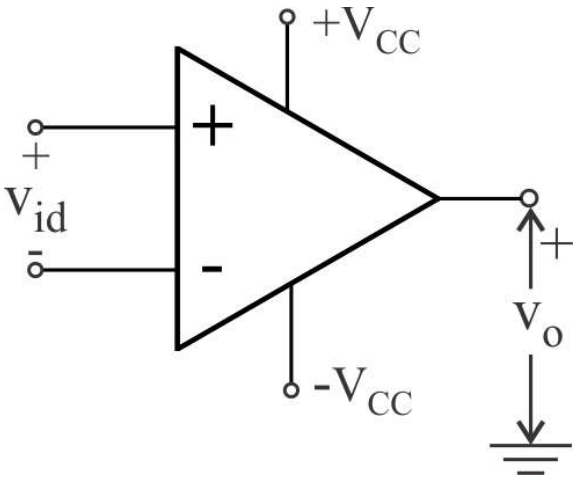


Što je pojačanje veće nagib prenosne karakteristike u linearnoj oblasti je veći. Linearna oblast kod realnog operacionog pojačavača je veoma uzana i odgovara ulaznom diferencijalnom naponu koji je reda mikrovolta.

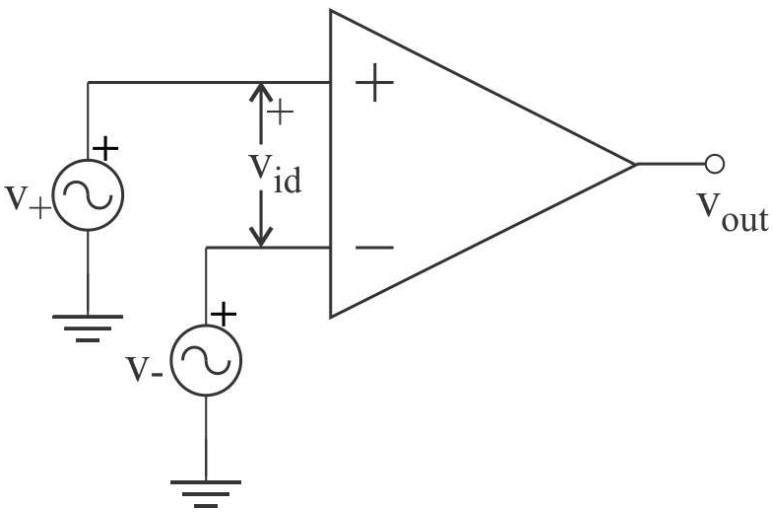
Prenosna karakteristika idealnog operacionog pojačavača

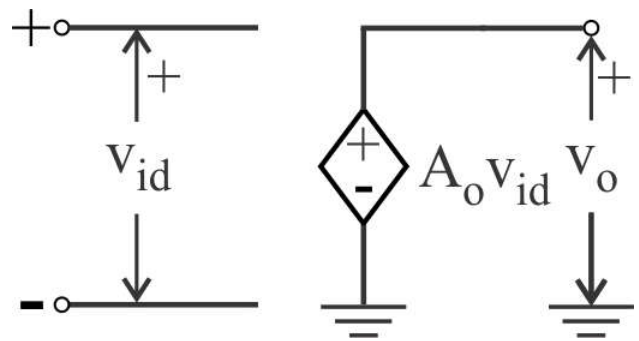
Idealni operacioni pojačavač ne postoji u praksi ali se model idealnog operacionog pojačavača često koristi prilikom analize kola. Idealni operacioni pojačavač ima beskonačno diferencijalno pojačanje. Kao posledica toga širina linearne oblasti je jednaka nuli, odnosno poklapa se sa ordinatom.





Idealni operacioni pojačavač ima beskonačnu vrednost naponskog pojačanja





$$A = \frac{v_{out}}{v_{id}}$$

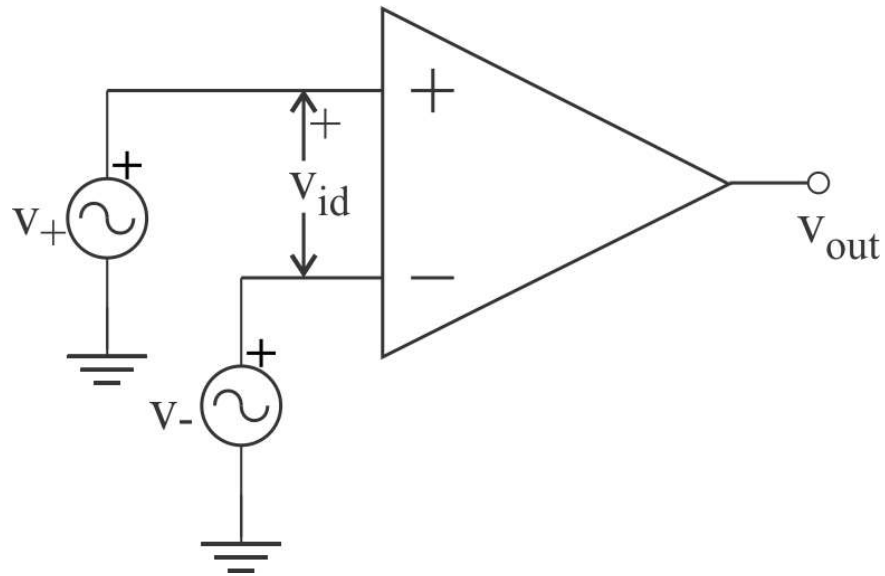
$$A \to \infty$$

$$v_{id} = \lim_{A\to\infty} \frac{v_i}{A} = 0$$

$$v_+ = v_-$$

Ukoliko je operacioni pojačavač u linearnoj oblasti rada, između ulaza se uspostavlja veoma mala vrednost napona. Kada bi diferencijalno pojačanje težilo beskonačnosti i operacioni pojačavač ostao u linearnoj oblasti diferencijalno pojačanje bi težilo nuli. Drugim rečima tada bi potencijali na ulazima trebali da budu jednaki.

Idealni operacioni pojačavač ima karakteristike idealnog diferencijalnog pojačavača



Na izlazu ne želimo DC komponentu niti signale koji su isti na oba ulaza. Pojačanje srednje vrednosti signala idealnog operacionog pojačavača je nula:

$$A_{cm} = \frac{v_{out}}{v_{icm}} = \frac{v_{out}}{\frac{1}{2}(v_+ + v_-)} = 0,$$

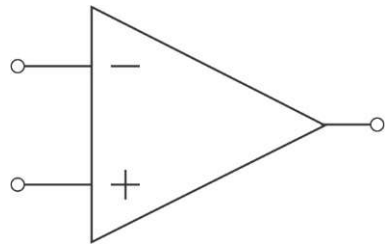
a razlika signala mora maksimalno da se pojača

$$A_d = \frac{v_{out}}{v_{id}} = \frac{v_{out}}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty$$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR (mera kvaliteta diferencijalnog pojačavača)

$$\boxed{CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \Rightarrow \infty}$$

Idealni operacioni pojačavač



Idealni operacioni pojačavač karakterišu:

beskonačno pojačanje razlike ulaznih signala → $v_{id} = v_+ - v_- = 0$, $v_+ = v_-$

beskonačna ulazna otpornost → $i_{in} = 0$, $v_{in} \neq f(R_g)$

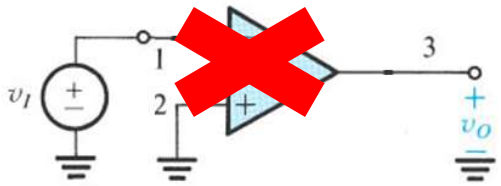
izlazna otpornost jednaka nuli → $v_o \neq f(R_p)$

ne pojačava srednju vrednost → $A_{cm} = 0$

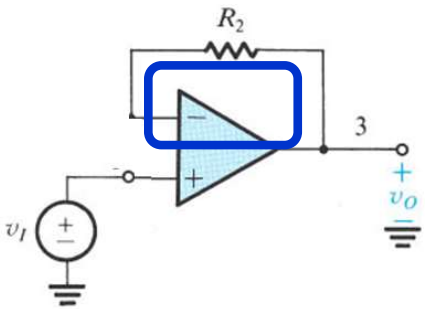
beskonačni propusni opseg → idealna frekvencijska karakteristika

Idealni operacioni pojačavač

Da bi operacioni pojačavač mogao da radi u linearnoj oblasti, odnosno da bi se primenjivao **u linearnim kolima** neophodno je da postoji **negativna povratna sprega**.



Kod kola koja sadrže negativnu povratnu spregu deo signala se vraća sa izlaza pojačavača na ulaz pojačavača i na taj način umanjuje ukupno pojačanje.



Pod dejstvom negativne povratne sprege između ulaznih priključaka operacionog pojačavača uspostavlja se vrlo mala vrednost napona (kada bi pojačanje O.P. bilo beskonačno uspostavila bi se nulta vrednost napona izmedju ulaza).

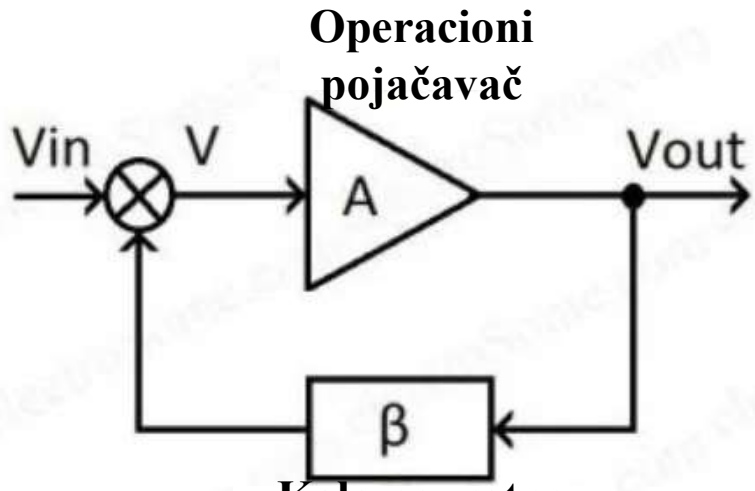
Dakle u linearnim kolima operacioni pojačavač se ne koristi bez dodatnih elemenata u kolu – preko kojih se ostvaruje negativna povratna sprega. U praksi to znači da kolo mora da sadrži element između izlaza i invertujućeg ulaza operacionog pojačavača.

Idealni operacioni pojačavač

U **linearnim kolima** operacioni pojačavač se ne koristi bez primene dodatnih elemenata preko kojih se ostvaruje negativna povratna sprega (biće više reči u nastavku kursa).

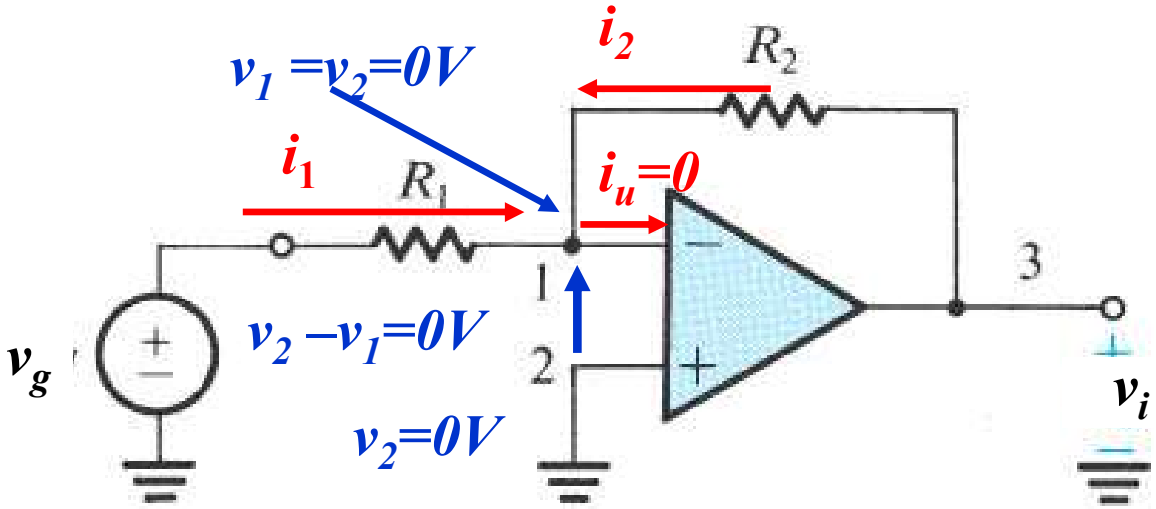
Pojačanje samog operacionog pojačavača bez dodatnih komponenata naziva **pojačanje u otvorenoj petlji** (Open loop gain)

Pojačanje kola sa operacionim pojačavačem u kome se sa dodtnim komponentama ostvaruje povratna sprega naziva se **pojačanje u zatvorenoj petlji** (Closed loop gain). Kolo povratne spreg se najčešeće sastoji od pasivnih komponenata (kondenzatora i otpornika).



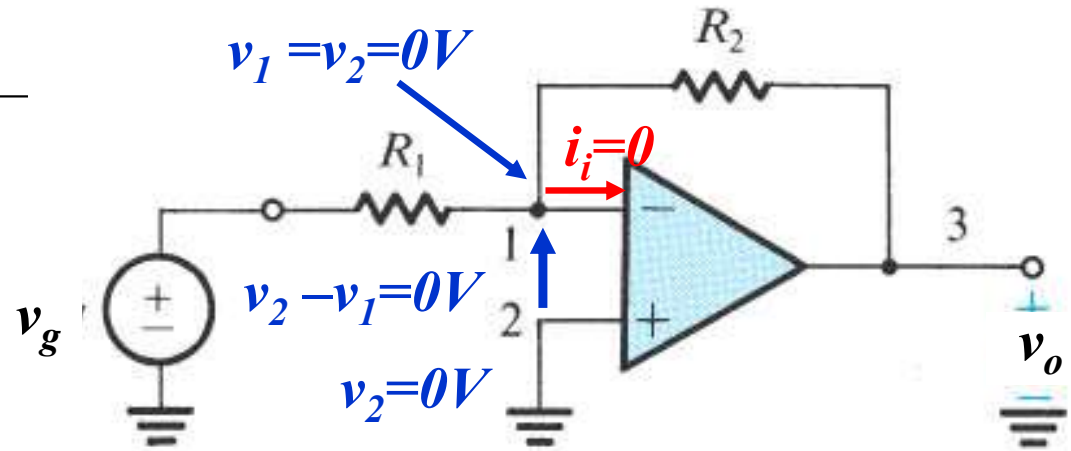
Invertorski pojačavač

Jedna od najznačajnijih primena operaciongo pojačavača je pojačanje signala. Kolo koje realizuje negativno pojačanje signala naziva se invertorski pojačavač.



Invertorski pojačavač

Čvor 1 je **virtuelna masa**. To znači da je na potencijalu mase a nije povezan sa masom. Iako su potencijali invertujućeg i neinvertujućeg ulaza jednaki za svaki od njih se piše posebna jednačina.

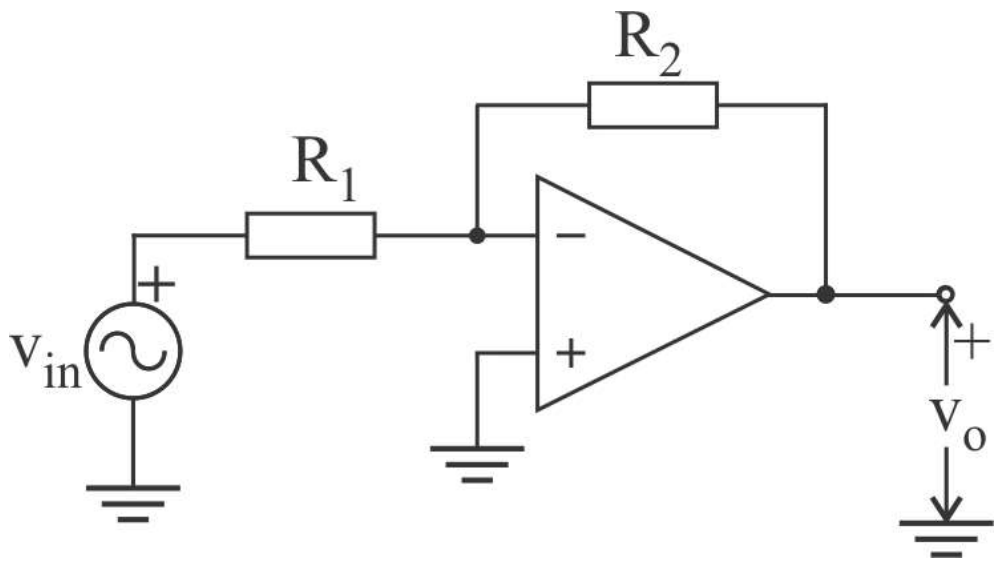


$$\left.\begin{array}{c} v_2 - v_1 = 0\ \text{V} \Rightarrow v_1 = 0 \\ i_i = 0\ \text{A} \\ \dfrac{v_1 - v_g}{R_1} + \dfrac{v_1 - v_o}{R_2} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{v_o}{R_2} = -\frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_g$$

$$A = \frac{v_o}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Invertorski pojačavač

U ovom kolu postoji **negativna povratna sprega** koje se realizuje sa otpornicima R_1 i R_2. Preko ovih otpornika signal se vraća sa izlaza na invertujući ulaz pojačavača.

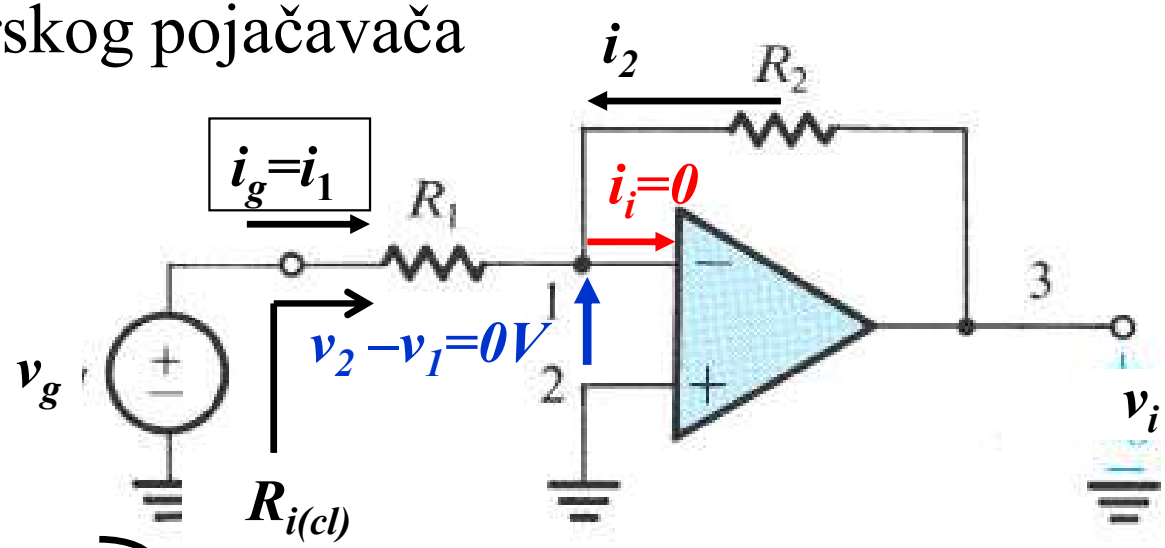


Pojačanje invertorskog pojačavača je negativno. Može se podešavati odnosom otpornika u kolu R_1 i R_2 pri čemu može da bude i manje od 1.

$$A = \frac{v_o}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Ulazna otpornost invertorskog pojačavača

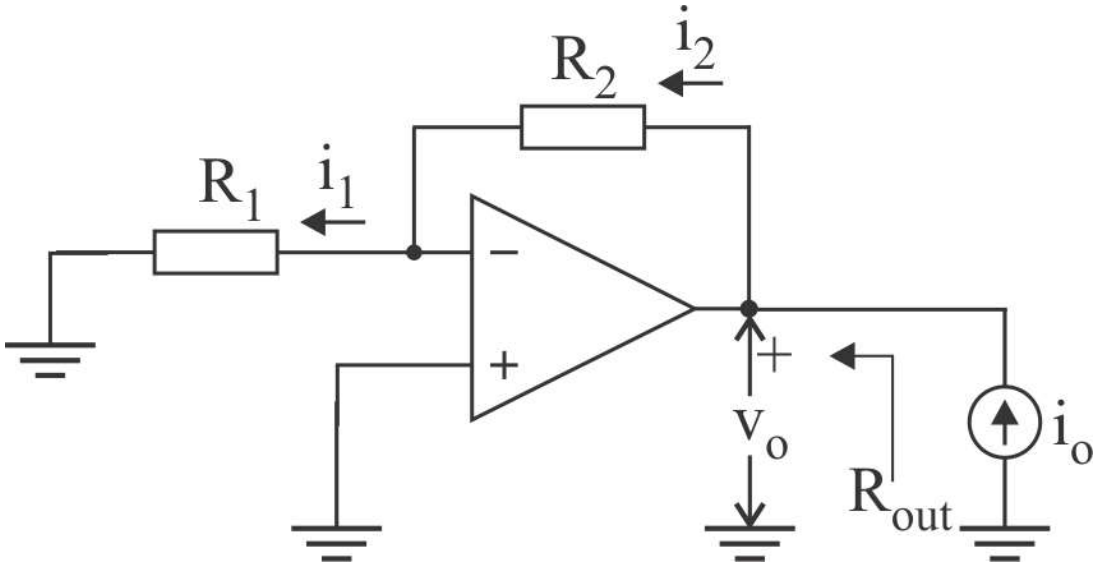
$$R_i = \frac{v_g}{i_g} = ?$$



$$\left.\begin{array}{c} i_i = 0 \\ v_1 = 0 \\ i_g = \dfrac{v_g - v_1}{R_1} = \dfrac{v_g}{R_1} \end{array}\right\} \Rightarrow \quad R_i = \frac{v_g}{i_g} = R_1$$

Ako se zahteva velika vrednost ulazne otpornosti R_i, mora se uvećati otpornost otpornika R_1. Da bi se održala vrednost pojačanja svako uvećanje otpornika R_1 treba da bude praćeno isto tolikim uvećanjem otpornika R_2 ($A = -\frac{R_2}{R_1}$).

Izlazna otpornost invertorskog pojačavača

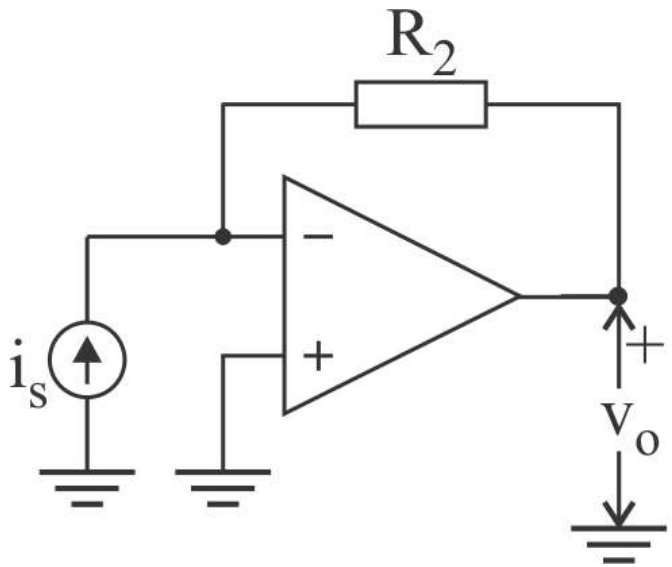


$$i_1 = i_2 = 0$$

$$R_{out} = \frac{v_0}{i_o} = \frac{i_2 \cdot R_2 + i_1 \cdot R_1}{i_o} = 0$$

Izlazna otpornost invertorskog pojačavača realizovanog idealnim operacionim pojačavačem jednaka je nuli.

Transrezistansni pojačavač – konvertor struje u napon



Ovo kolo se često koristi u optičkim komunikacionim sistemima na mestu gde se optički signal konvertuje u električni. Izvor signala predstavljen strujnim generatorom je najčešće foto dioda.

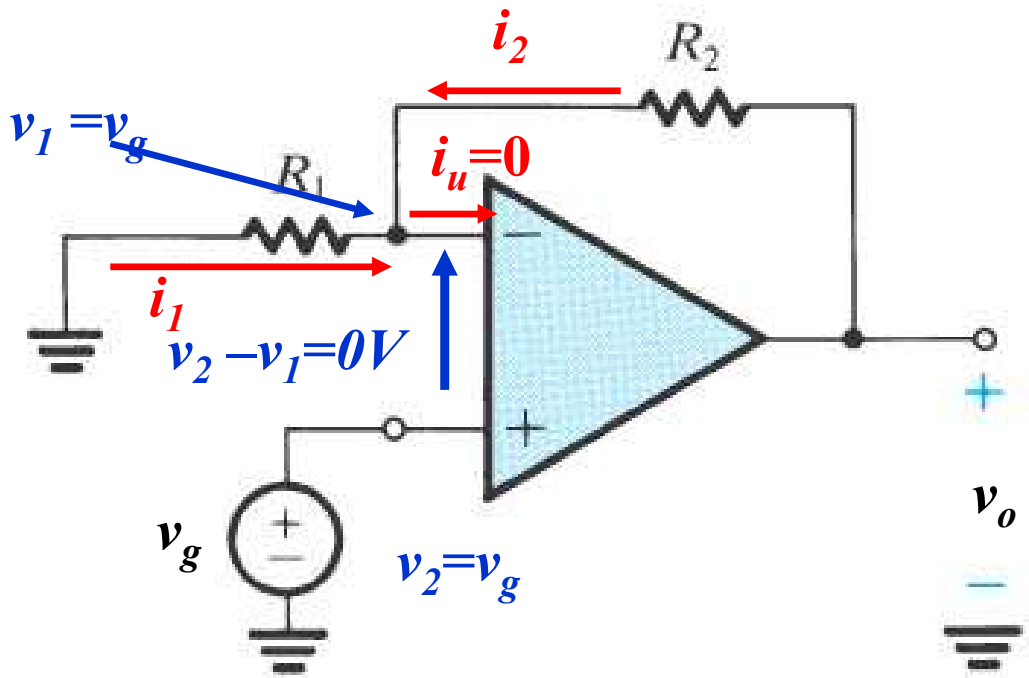
Kolo je okrakterisano sa prenosnom otpornošću R_t. Ulazna otpornost R_{in} je jednaka nuli i izlazna otpornost R_{out} je jednaka nuli.

$$R_t = \frac{v_o}{i_s} = -\mathrm{R}_2$$

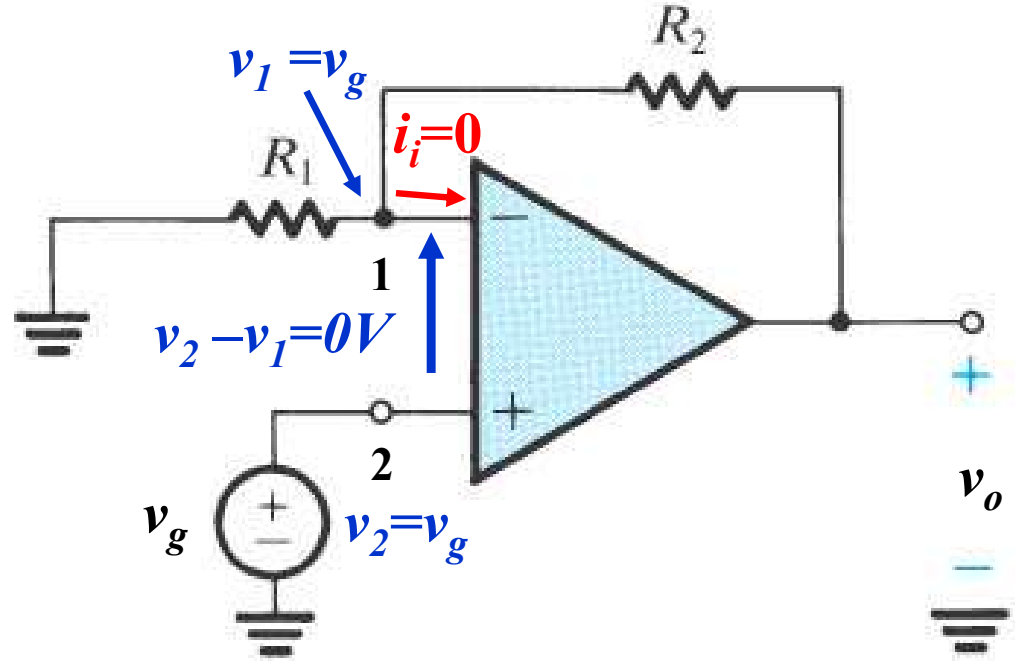
$$R_{in} = 0 \quad R_{out} = 0$$

Neinvertorski pojačavač

Neinvertorski pojačavač je kolo sa operacionim pojačavačem koje realizuje pozitivno pojačanje. Ovo kolo sadrži dva otpornika od kojih je jedan povezan između invertujućeg ulaza i mase, a drugi između invertujućeg ulaza i izlaza.



Neinvertorski pojačavač



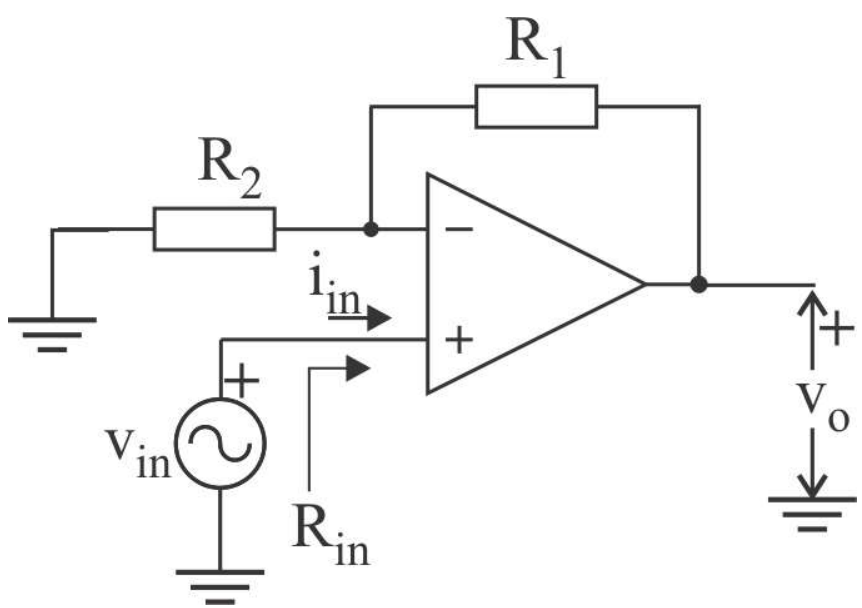
$$\left.\begin{array}{c} v_1 = v_2 = v_g \\ i_i = 0 \\ \dfrac{v_1}{R_1} + \dfrac{v_1 - v_o}{R_2} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{v_o}{R_2} = \frac{v_g}{R_1} + \frac{v_g}{R_2} \Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_g$$

$$\boxed{A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Neinvertorski pojačavač

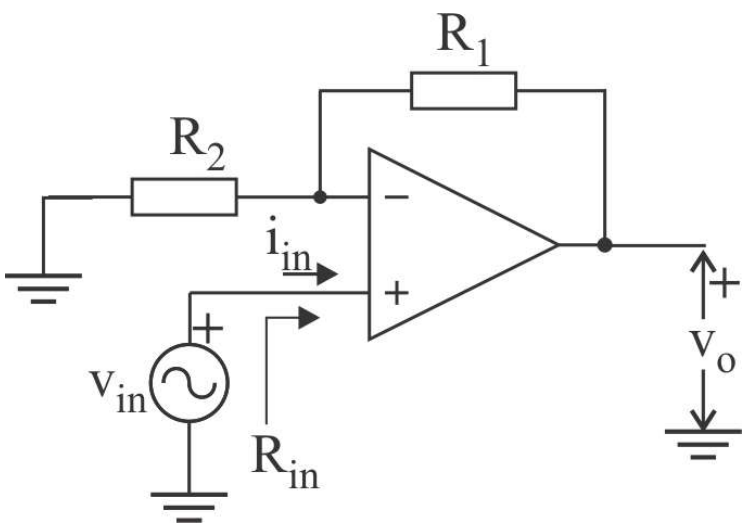
U ovom kolu postoji negativna povratna sprega koje se realizuje sa otpornicima R_1 i R_2. Preko ovih otpornika signal se vraća sa izlaza na invertujući ulaz pojačavača.

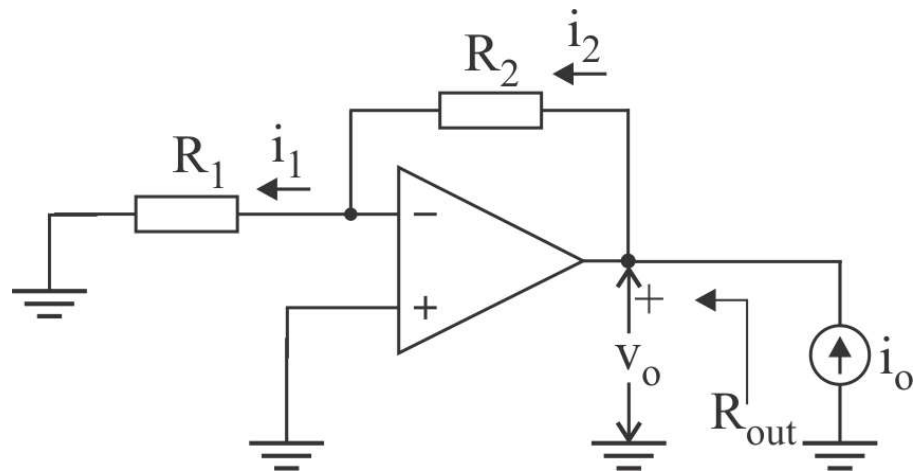
Pojačanje invertorskog pojačavača je pozitivno. Može se podešavati odnosom otpornika u kolu R_2 i R_1 pri čemu je uvek veće od 1.



$$A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Ulazna i izlazna otpornost neinvertorskog pojačavača





$$R_i = \frac{v_g}{i_g}$$

$$R_{in} \to \infty$$

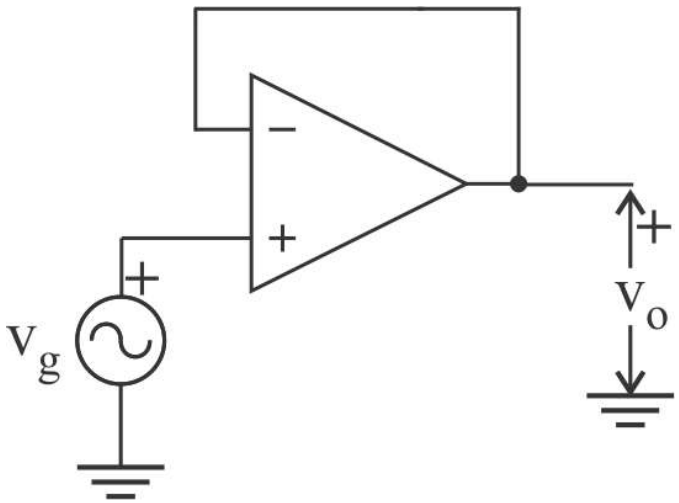
$$i_1 = i_2 = 0$$

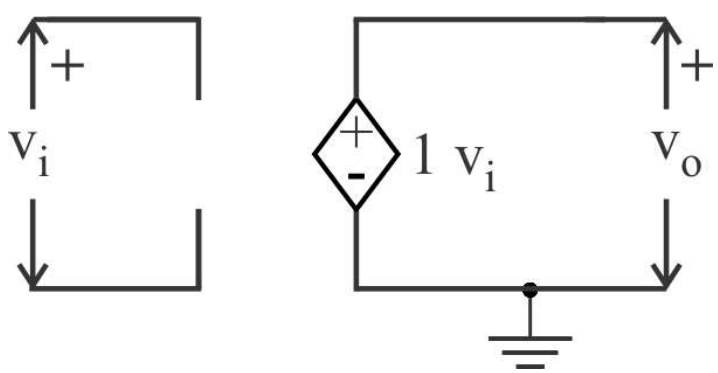
$$R_{out} = \frac{v_0}{i_o} = \frac{i_2 \cdot R_2 + i_1 \cdot R_1}{i_o} = 0$$

Neinvertorski pojačavač ima beskonačnu ulaznu otpornost i nultu izlaznu otpornost. Ovaj pojačavač ima karakteristike idealnog naponskog pojačavača.

Naponski bafer

Naponski bafer je pojačavač čija je uloga da vrednost napona koju daje izvor signala (ili prethodni pojačavčki stepen) učini nezavisnim od vrednosti struje koja protiče kroz potrošač (ili naredni pojačavački stepen).





Idealni naponski bafer ima beskonačnon veliku ulaznu impedansu i beskonačno malu izlaznu impedansu.

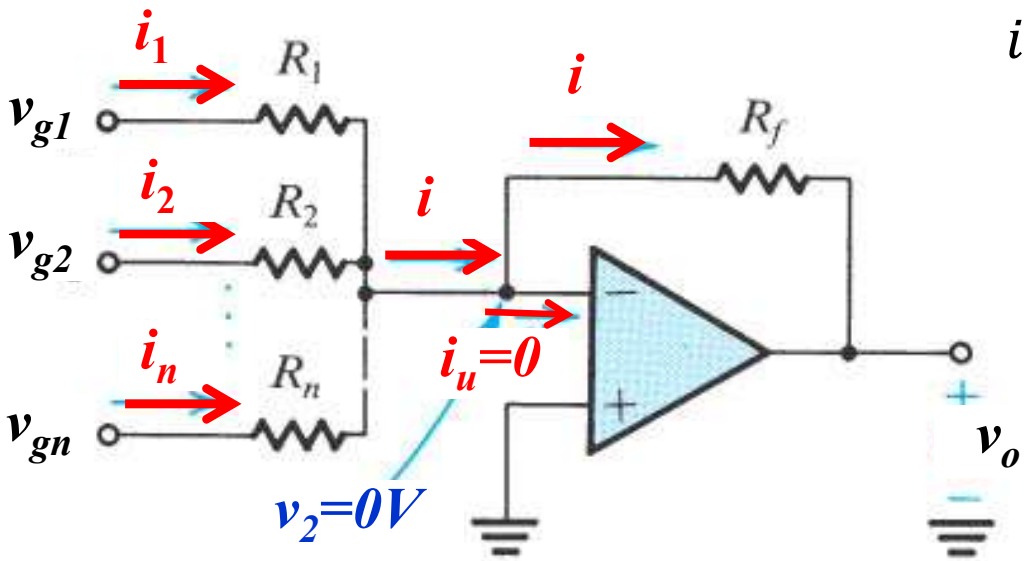
Naponski bafer se veoma jednostavno realizuje operacionim pojačavačem tako što se povežu invertujući ulaz i izlaz. Ulaz bafera je na neinvertujućem ulazu.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_g \Bigg|_{\substack{R_2=0 \\ R_1 \to \infty}} = V_g$$

$$A = \frac{v_o}{v_g} = 1 \qquad R_{i(CL)} \to \infty$$

$$R_{o(CL)} = 0$$

Kolo za sabiranje



$$i_1 = \frac{v_{g1}}{R_1}; \quad i_2 = \frac{v_{g2}}{R_2}; \quad \dots \; i_n = \frac{v_{gn}}{R_n}$$

$$i = i_1 + i_2 + \ldots + i_n$$

$$v_o = 0 - iR_f$$

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_{g1} + \frac{R_f}{R_2} v_{g2} + \quad \dots \quad + \frac{R_f}{R_n} v_{gn}\right)$$

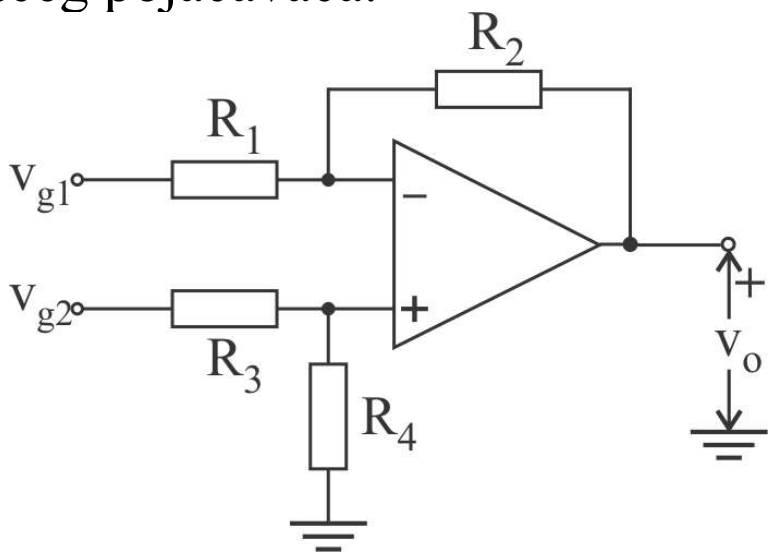
Na ulazu se naponi konvertuju u struje. Zbir struja kroz ulazne grane, i, se na otporniku u povratnoj sprezi R_f konvertuje u napon.

Promenom vrednosti otpornika mogu da se menjaju koeficijenti uz pojedine ulazne napone.

Diferencijalni balansni pojačavač

Uloga diferencijalnog pojačavača je da pojača isključivo razliku dva signala a da pri tome maksimalno oslabi srednju vrednost signala. **Diferencijalni pojačavači** imaju veliku primenu jer se njima postiže eliminisanje smetnji koje su uglavnom sadržane u srednjoj vrednosti signala.

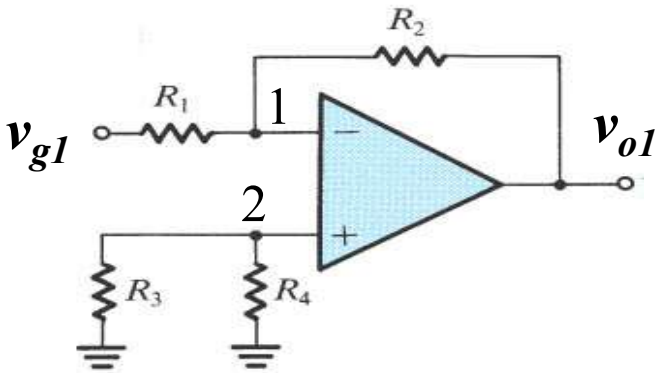
Iako operacioni pojačavač pojačava razliku ulaznih signala on se ne koristi samostalno kao diferencijalni pojačavač jer je diferencijalno pojačanje suviše veliko i ne može da se menja.Potrebno je dodavanjem spoljnih elemenata napraviti diferencijalni pojačavač kome će moći da se menja vrednost diferencijalnog pojačanja kao kod invertorskog i neinvertorskog pojačavača. Najjednostavnije kolo diferencijalnog pojačavača realizovanog primenom operacionog pojačavača je prikazano na donjoj slici. Ovaj pojačavač se zove **diferencijalni balansni pojačavač** i dobija se kombinovanjem invertujućeg i neinvertujućeg pojačavača.



Diferencijalni balansni pojačavač

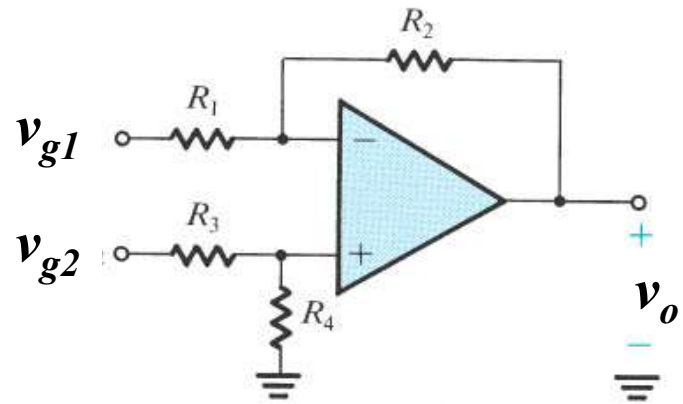
Prilikom određivanja naponskog pojačanja primenjujemo princip superpozicijie.

1) Kada je $v_{g2} = 0$ kolo se ponaša kao invertujući pojačavač.

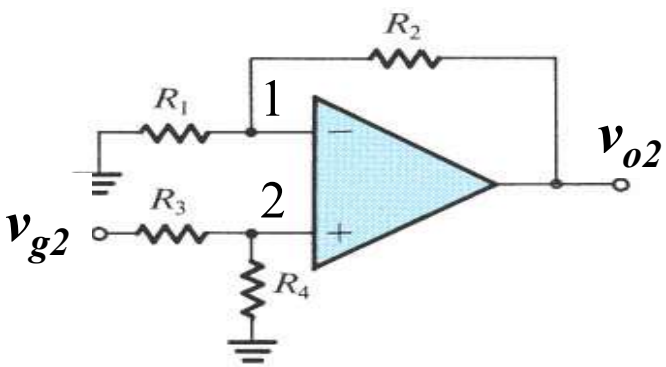


$$v_2 = 0$$

$$v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{g1}$$



2) Kada je $v_{g1} = 0$ kolo se ponaša kao neinvertujući pojačavač.



$$v_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{g2}$$

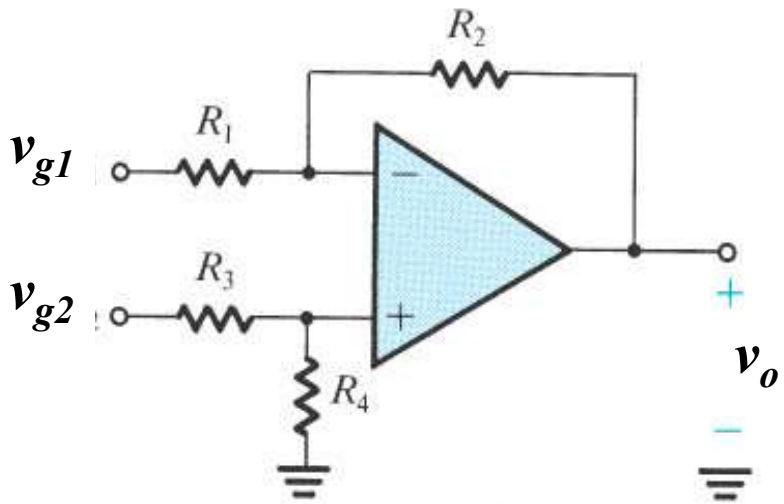
$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_2$$

$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{g2}$$

$$v_o = v_{o1} + v_{o2}$$

$$v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_{g1} + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_{g2}$$

Diferencijalni balansni pojačavač



$$v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_{g1} + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_{g2}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}}$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1}\left(v_{g2} - v_{g1}\right)$$

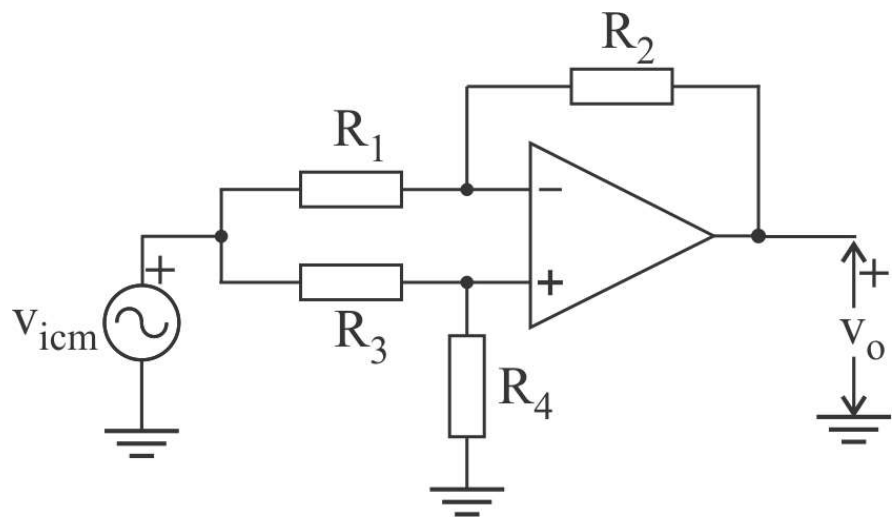
$$\boxed{A_d = \frac{v_o}{v_{g2} - v_{g1}} = \frac{R_2}{R_1}}$$

Izjednačavanjem koeficijenata uz v_{g1} i v_{g2} dobija se uslov koji treba da zadovolje otpornici u kolu da bi ono funkcionisalo kao diferencijalni pojačavač. Ovo je praktično uslov da izlazni napon bude jednak nuli kada je pobuda simetrična ($v_{g1} = v_{g2}$).

Za one koji žele da nauče više

Diferencijalni balansni pojačavač

Pojačanje srednje vrednosti idealnog diferencijalnog pojačavača je jednako nuli.



$$A_{cm} = \frac{v_o}{v_g}\bigg|_{v_{g1} = v_{g2} = v_{icm}}$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

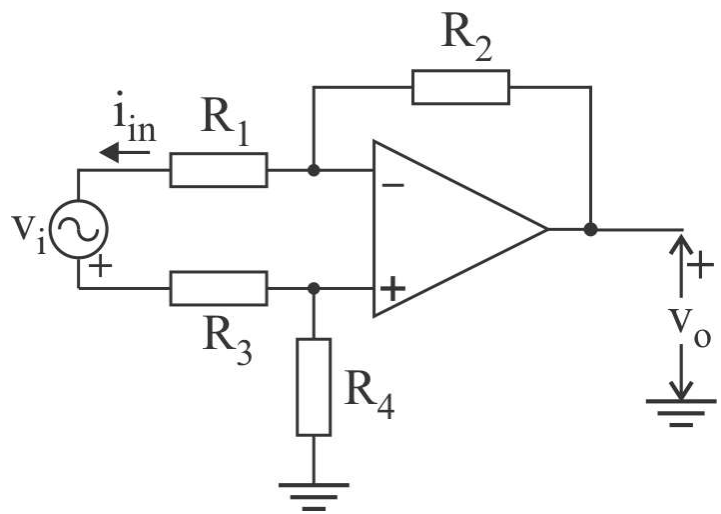
$$v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_{icm} + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_{icm} = v_{icm} \cdot \left(\frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Ukoliko bi otpornici bili idealni, bez tolerancija, pojačanje srednje vrednosti bi bilo jednako nuli. U praksi uvek postoji odstupanje otpornosti otpornika od nominalne vrednosti. Na pojačanje srednje vrednosti najviše utiču tolerancije otpornika.

Za one koji žele da nauče više

Diferencijalni balansni pojačavač

Ulazna otpornost diferencijalnog balasnog pojačavača



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_{in}}$$

$$v_i = R_3 i_{in} + (v_+ - v_-) + R_1 i_{in} = (R_1 + R_3) \cdot i_{in} + 0 = (R_1 + R_3) \cdot i_{in}$$

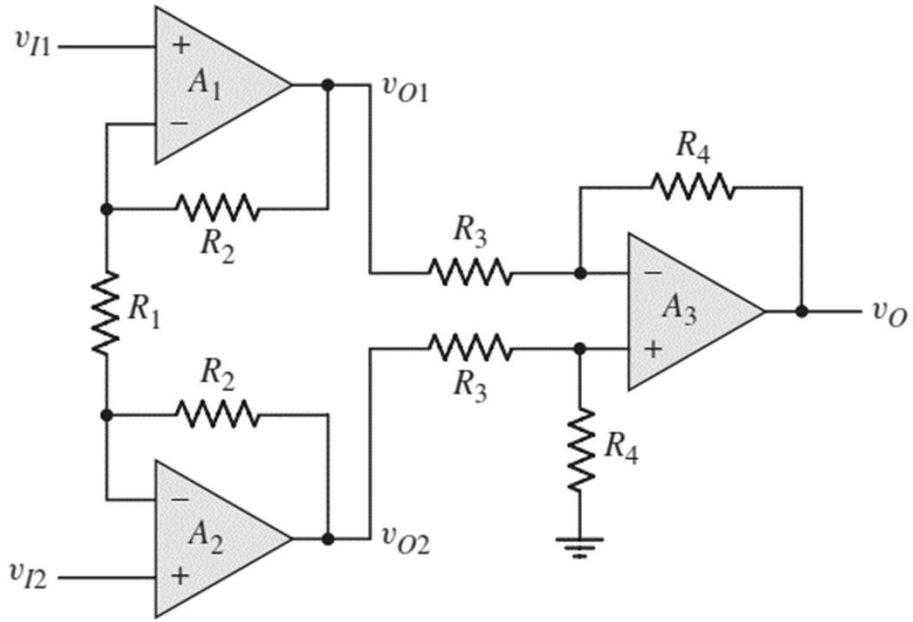
$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = (R_1 + R_3)$$

Ako se zahteva velika ulazna otpornost R_{in}, R_1 mora da bude veliko. Da bi zadržali vrednost pojačanja to znači da mora i otpornost R_2 da se poveća.

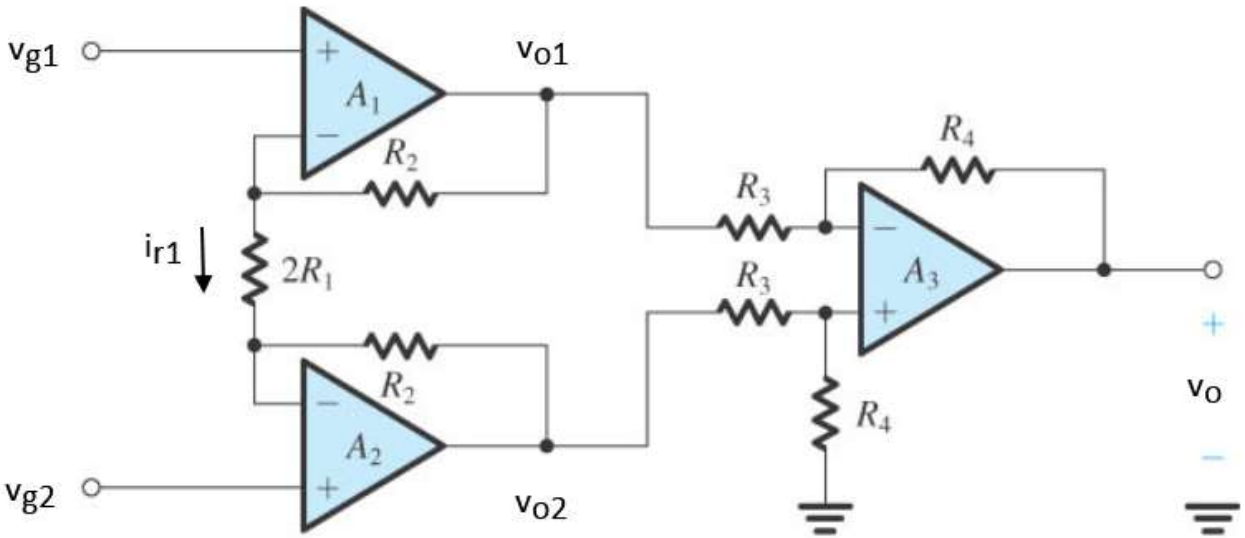
Instrumentacioni pojačavač

Postoje primene u kojima se zahteva velika ulazna otpornost diferencijalnog pojačavača kako se signal ne bi oslabio. Jedna od tih primena je merenje. Voltmetar mora da ima jako veliku ulaznu otpornost da ne bi uticao na napon koji se meri. Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?

S obzirom da balansni diferencijalni pojačavač ima malu vrednost ulazne impedanse potrebno je dodati ulazni pojačavački stepen čija je funkcija povećanje ulazne impedanse. Kao ulazni stepen koriste se dva neinvertujuća pojačavača jer je njihova ulazna impedansa veoma velika (kod idelanog O.P. beskonačna).



Instrumentacioni pojačavač



$$i_{r1} = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{2 \cdot R_1}$$

$$v_{o1} - v_{o1} = i_{r1} \cdot (2 \cdot R_1 + 2 \cdot R_2)$$

Prvi stepen $\quad v_{o1} - v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot (v_{g1} - v_{g2})$

Drugi stepen $\quad v_o = \frac{R_4}{R_3}(v_{o2} - v_{o1})$

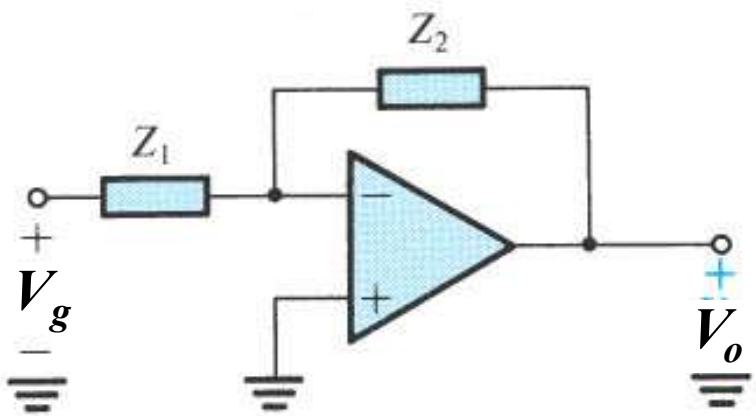
Prvi stepen ima ulogu naponskog bafera za srednju vrednost signala (za srednju vrednost signala kolo ima jednično pojačanje). Sastoji se od dva operaciona pojačavača, A_1 i A_2, kao i otpornika R_2, R_1.

Drugi stepen čini balasni diferencijalni pojačavač (A_3 sa otpornicima R_3 i R_4) i njegova uloga je da potisne srednju vrednost signala.

Pojačanje instrumentacionog pojačavača se obavlja pomoću otpornika R_1. Obično se ova otpornost priključuje spolja, izvan integrisanog kola.

$$A_d = \frac{v_o}{v_{g2} - v_{g1}} = \frac{R_4}{R_3}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Invertujući pojačavač sa impedansama



$$A = \frac{V_o(s)}{V_g(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

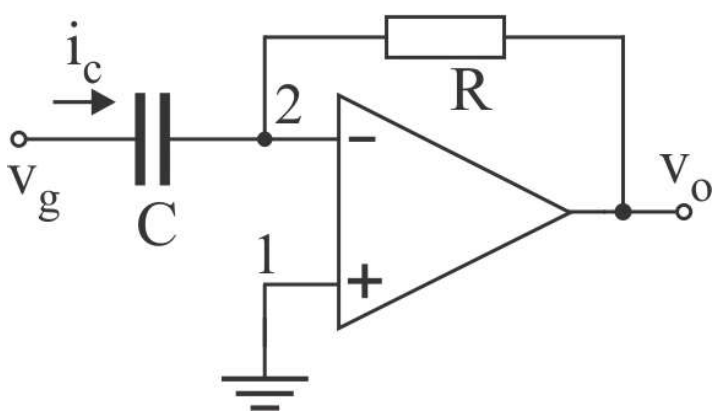
Kolo za diferenciranje

Napon na kondenzatoru, C, jednak je ulaznom naponu jer je on jednim svojim krajem vezan za ulaz a drugim za virtuelnu masu. S obzirom da je struja kroz kondenzator proporcionalna izvodu napona na kondenzatoru, sledi da će struja kroz C biti srazmerna izvodu ulaznog napona. Kroz otpornik R teče ista struja kao kroz kondenzator i stvara pad napona koji je srazmeran izvodu ulaznog napona.

Vremenska zavisnost količine naelektrisanja na oblogama kondenzatora $Q(t)$ može se izraziti kao: $Q(t) = C \cdot v_C(t)$

odakle sledi da je struja kroz kondnezator jednaka:

$$i_c(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt}$$

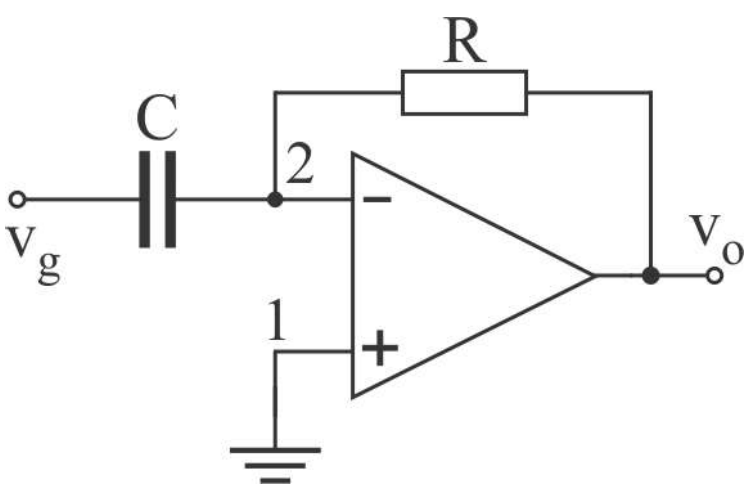


$$\left.\begin{aligned} i_c(t) &= C\frac{dv_C(t)}{dt} \\ v_c(t) &= v_g(t) - 0 \\ v_o(t) &= -i_c(t) \cdot R \end{aligned}\right\} \quad C\frac{dv_g(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)}{R}$$

$$v_o(t) = -R \cdot C \cdot \frac{dv_g(t)}{dt}$$

Kolo za diferenciranje

Sa porastom frekvencije smanjuje se reaktansa kondenzatora, što prouzrokuje porast struje koja teče kroz otpornik R i kondenzator C. Usled porasta struje raste i pad napona na otporniku R a samim tim i napon na izlazu. Struja kroz C direktno srazmerna frekvenciji signala jer je reaktansa kondenzatora je obrnuto srazmeran frekvenciji signala. Odavde proizilazi i da je izlazni napon direktno srazmeran frekvenciji signala.



$$\left.\begin{aligned} &(v_2 - v_g)\cdot s\cdot C + (v_2 - v_o)\cdot \frac{1}{R} = 0 \\ &v_1 = v_2 = 0 \end{aligned}\right\} \boxed{A(s) = \frac{v_o}{v_g} = -s\cdot R\cdot C}$$

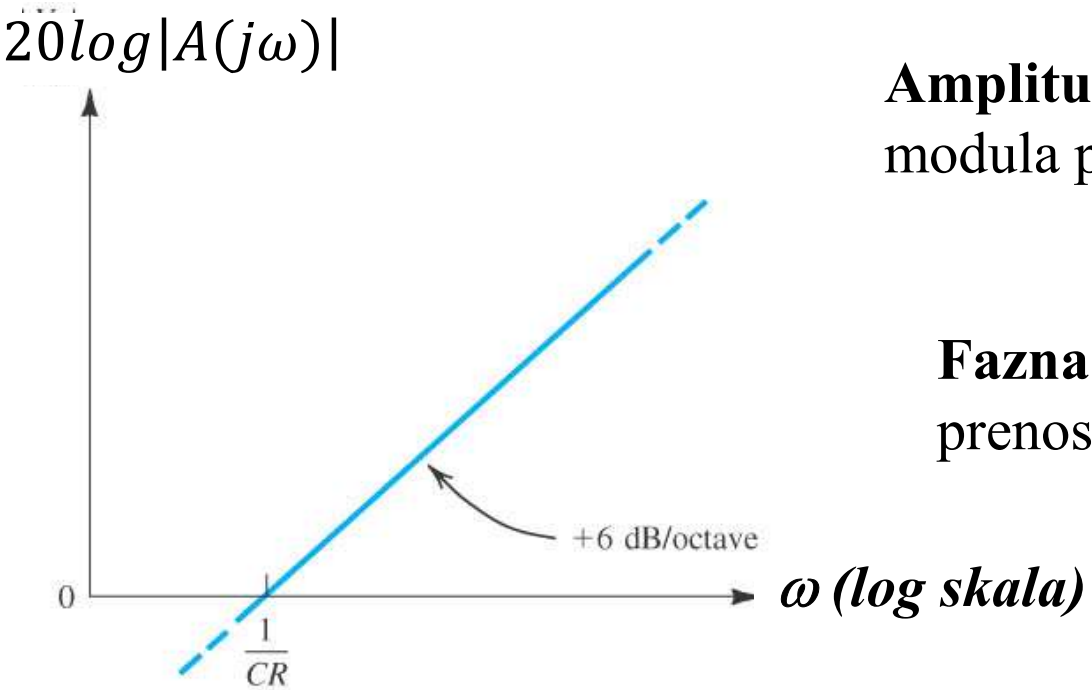
$$A(s) = -\frac{s}{\omega_o}$$

$$\omega_o = \frac{1}{R\cdot C}$$

Kolo za diferenciranje

Kolo za diferenciranje – frekvencijska karakteristika

$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -sRC = -\frac{s}{\omega_o}$$



Amplitudska karakteristika je zavisnost modula prenosne funkcije od frekvencije.

$$|A(j\omega)| = \omega RC$$

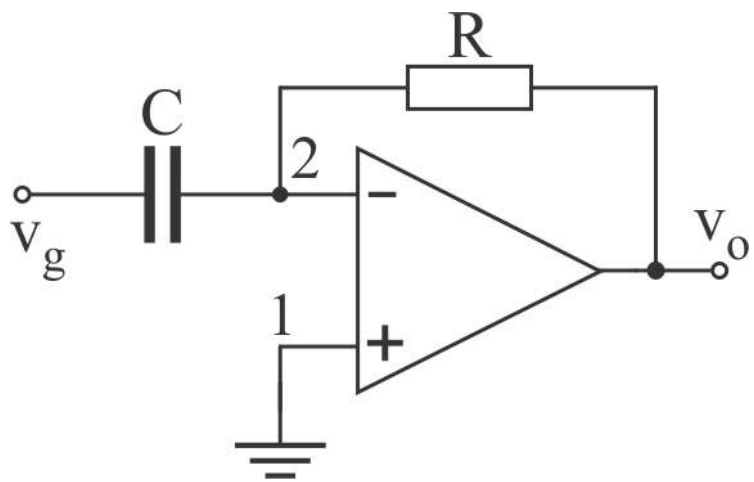
Fazna karakteristika je zavisnost argumenta prenosne funkcije od frekvencije.

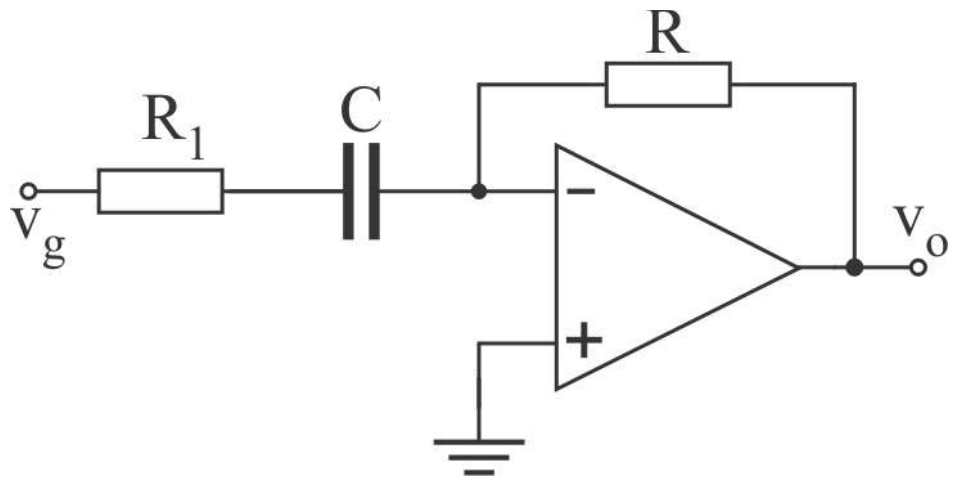
$$arg\big(A(j\omega)\big) = -\pi/2$$

Ponaša se kao filtar propusnik visokih frekvencija sa graničnom frekvencijom koja je jednaka nuli.

Kolo za diferenciranje

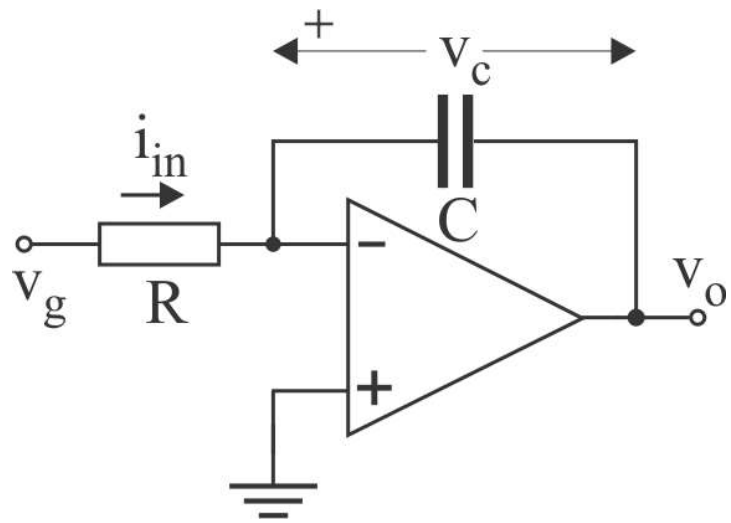
Loša osobina kola za diferenciranje je da se sa pojačanjem visokofrekvencijskih komponenti signala značajno pojačava i šum. Usled toga na izlazu pojačavača je smanjen odnos signal šum. Da bi se umanjile posledice ove pojave često sa na red sa kondnezatorom C vezuje otpornik čime se umanjuje pojačanje na visokim frekvencijama. U ovom kolu dobija se pol sa konačnom vrednošću. Kada frekvencija teži beskonačnosti naponsko pojačanje ovog kola teži vrednosti $A = -\frac{R}{R_1}$.





Kolo za integraljenje

Napon na otporniku R jednak je ulaznom naponu jer je jednim krajem povezan za ulaz a drugim za virtuelnu masu. Struja koja teče kroz otpornik biće srazmerna ulaznom naponu v_g. Ista ova struja protiče kroz kondenzator i na njemu se akumulira količina naelektrisanja srazmerna integralu struje. Izlazni napon je jednak naponu na kondenzatoru jer je jednim krajem povezan za vurtuelnu masu a drugim za izlazni čvor. U izrazu za vremensku zavisnost izlaznog napona mora se uzeti u obzir vrednost napona na kondenzatoru u početku $V_C(0)$.



$$Q(t) = C \cdot v_C(t)$$

$$i_{in}(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C\frac{dv_C(t)}{dt}$$

$$i_{in}(t) = \frac{v_g(t) - 0}{R} = \frac{v_g(t)}{R}$$

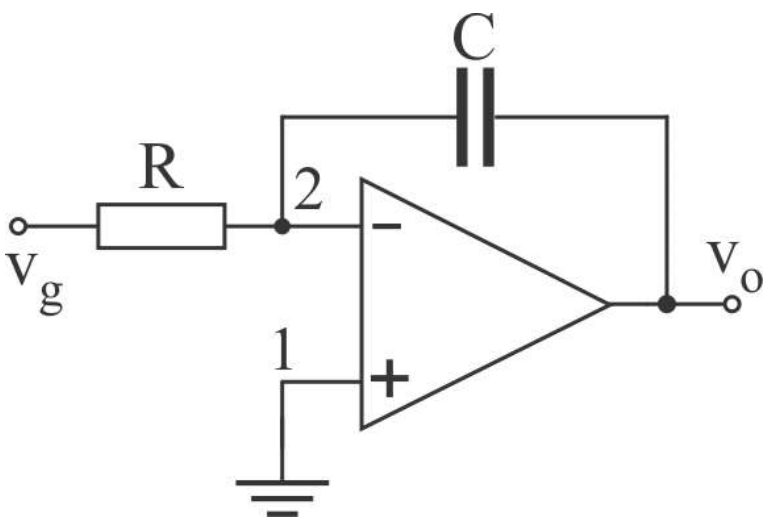
$$v_c(t) = -v_o(t)$$

$$\frac{v_g(t)}{R} = -C\frac{dv_o(t)}{dt}$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_g(\tau)d\tau - V_c(0)$$

Kolo za integraljenje

Struja koja protiče kroz otpornik R i kondnezator C ne zavisi od frekvencije jer je jednaka $\frac{v_g}{R}$. Sa porastom frekvencije smanjuje se reaktansa kondenzatora, što ima za posledicu smanjenje pada napona na kondenzatoru a samim tim i na izlazu. Reaktansa kondenzatora je obrnuto srazmeran frekvenciji signala. Odavde proizilazi da je i izlazni napon obrnuto srazmeran frekvenciji signala.



$$\left.\begin{aligned} (v_2 - v_o)\cdot sC + \left(v_2 - v_g\right)\cdot \frac{1}{R} &= 0 \\ v_1 = v_2 &= 0 \end{aligned}\right\} v_o = -\frac{1}{sCR} v_g$$

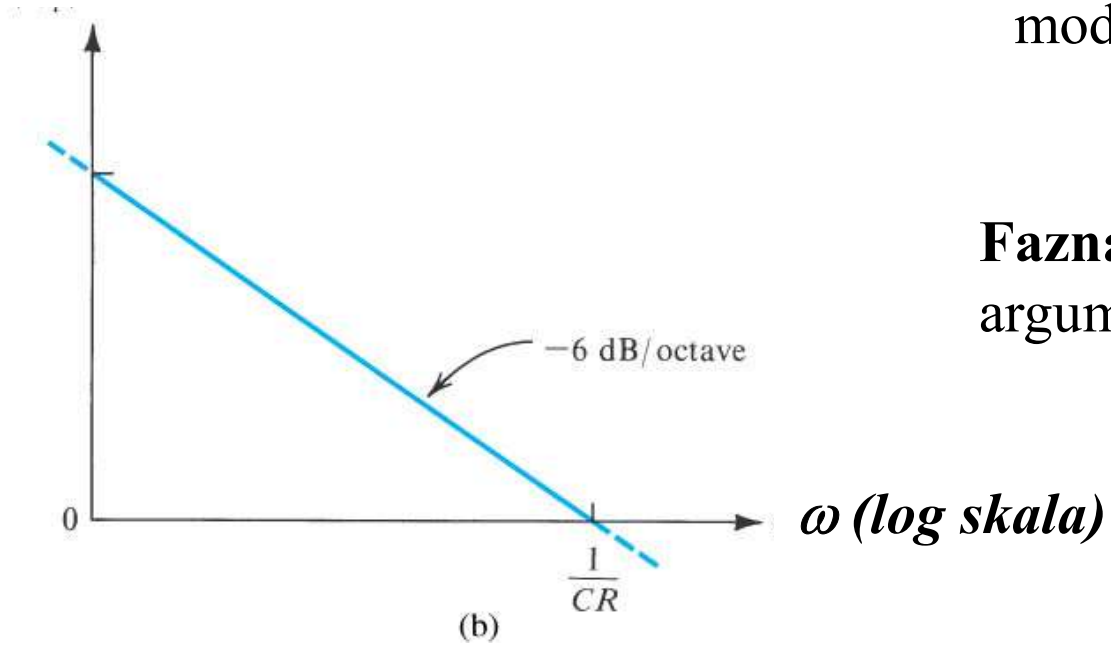
$$A(s) = \frac{v_o}{v_g} = -\frac{1}{sCR}$$

Kolo za integraljenje

Frekvencijska karakteristika

$$A(s) = -\frac{1}{sRC} = -\frac{\omega_o}{s} = -\frac{\omega_o}{j\omega} = j\frac{\omega_o}{\omega}$$

$20log|A(j\omega)|$



Amplitudska karakteristika je zavisnost modula prenosne funkcije od frekvencije.

$$|A(s)| = \frac{1}{\omega RC}$$

Fazna karakteristika je zavisnost argumenta prenosne funkcije od frekvencije.

$$\arg(A(j\omega)) = \pi/2$$

Ponaša se kao filtar propusnik niskih frekvencija sa graničnom frekvencijom u nuli.

Logaritamski pojačavač

Logaritamski pojačavač daje izlazni napon proporcionalan logaritmu ulaznog napona. Rad logaritamskog pojačavača zasniva se na primeni strujno naponske karakteristike direktno polarisanog pn spoja diode ili bipolarnog tranzistora. Ovim kolom može se ostvariti pojačanje u vrlo velikom opsegu ulaznog napona.

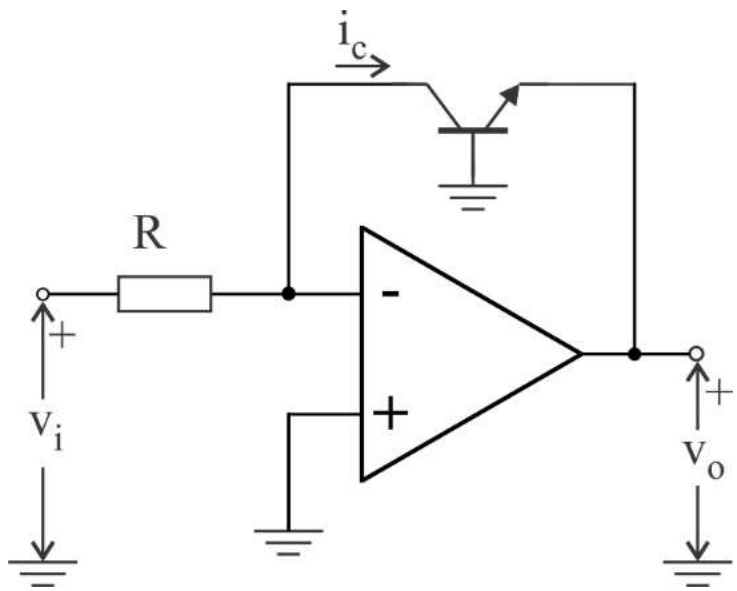
Na otporniku R konvertuje se ulazni napon u struju. Ova struja postaje struja kolektora tranzistora. Napon na emitroskom pn spoju, v_{BE} srazmeran je logaritmu kolektorske struje, a samim tim logaritmu ulaznog napona.

$$i_e \approx i_C = \frac{v_i}{R}$$

$$i_E = I_{ES} \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$

$$v_o = -v_{BE}$$

$$v_o = -V_T \cdot ln \frac{v_i}{R \cdot I_{ES}}$$



Logaritamski pojačavač

Signali koji se pojavljuju u određenim uređajima imaju toliko veliki dinamički opseg (preko 100 dB) da se ne mogu ili vrlo teško mogu isprojektovati pojačavači ili AD konvertori za njihovu obradu. Ovakvi signali se pojavljuju u radarima, sonarima, komunikacionim sistemima, optičkim kablovima. Da bi se rešio ovaj problem primenjuju se logaritamski pojačavači. Logaritamski pojačavači su nelinearna analogna kola čije pojačanje zavisi od vrednosti signala i smanjuje se sa povećanjem nivoa signala. Ova funkcija logaritamskih pojačavača zapravo predstavlja kompresiju signala po amplitudi.

Kompresija signala ima višestruki značaj. Kompresijom signala velikog dinamičkog opsega omogućava se primena AD konvertora sa malim brojem bitova. Na taj način proširuje se primena mikrokontrolera i sistema koji već imaju ugrađene AD konvertore. Kompresija signala je potrebna i kod obrade signala sa senzora koji imaju eksponencijalnu prenosnu karakteristiku.

Eksponencijalni pojačavač

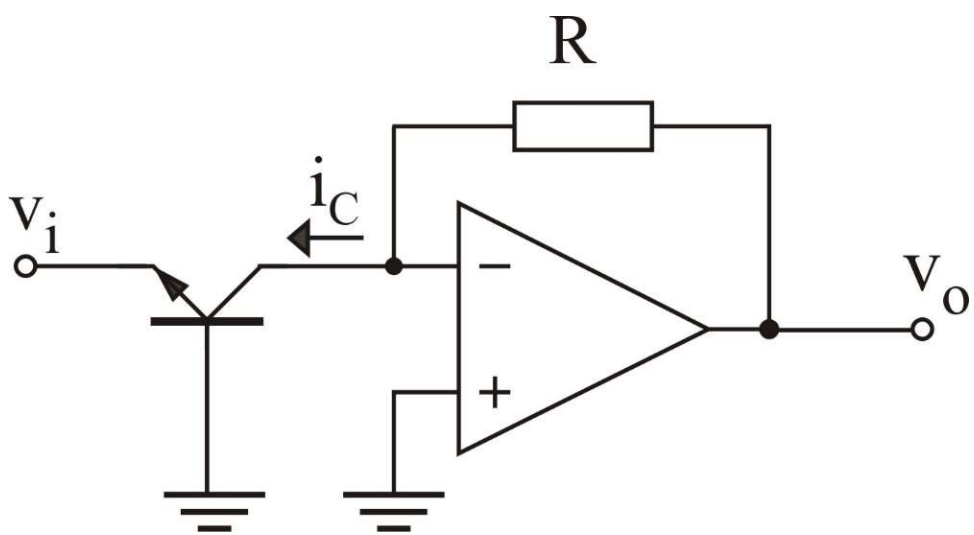
Eksponencijalni pojačavač daje na izlazu napon koji je eksponencijalna funkcija ulaznog napona. Ovo kolo se obično koristi zajedno sa logaritamskim pojačavačem za dekompresiju signala. Princip rada zasniva se na strujno naponskoj karakteristici direktno polarisanog pn spoju.

$$v_o = i_c \cdot R$$

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

$$v_i = -v_{BE}$$

$$v_o = I_S \cdot R \cdot e^{-\frac{v_i}{V_T}}$$



Da se podsetimo:
idealne operacione pojačavače karakterišu:

beskonačno pojačanje razlike ulaznih signala ⇒ $v_u = v_d = v_+ - v_- = 0$, $v_+ = v_-$

beskonačna ulazna otpornost ⇒ $i_u = 0$, $v_u \neq f(R_g)$

izlazna otpornost jednaka nuli ⇒ $v_i \neq f(R_p)$

ne pojačava *srednju vrednost* ⇒ $A_{cm} = 0$

beskonačni propusni opseg ⇒ ***idealne f k-ke***

Realne operacione pojačavače karakterišu:

Konačno pojačanje razlike ulaznih signala ⇒ $v_u = v_d = v_+ - v_- = v_i/A$, $v_+ \neq v_-$

ulazna otpornost konačna ⇒ $i_u \neq 0$, $v_u = f(R_g)$

izlazna otpornost konačna ⇒ $v_i = f(R_p)$

pojačava *srednju vrednost* ⇒ $A_{cm} \neq 0$

propusni opseg konačan ⇒ ***realne f k-ke***

Realni operacioni pojačavač

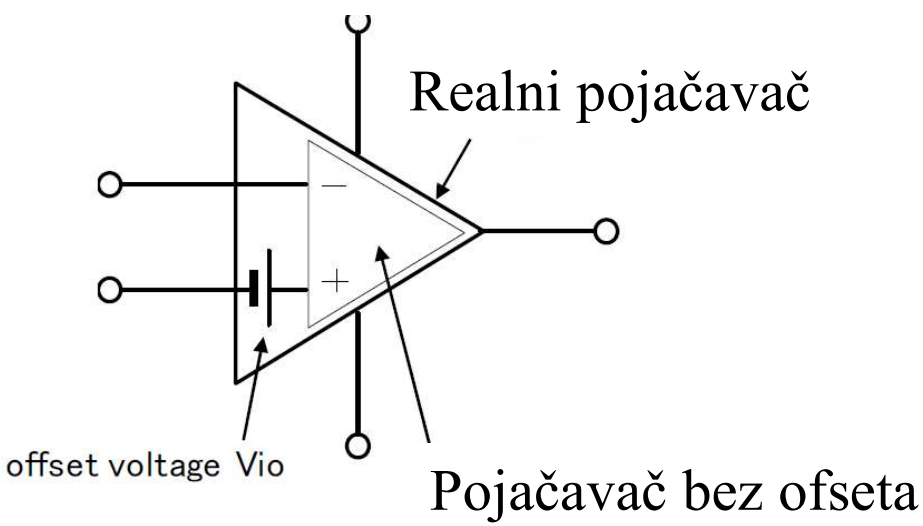
Naponski ofset (razdešenost)

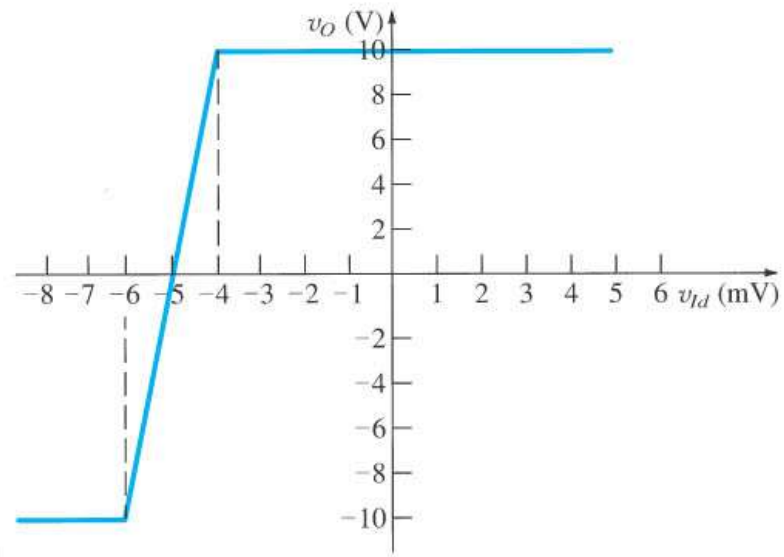
• **Definicija**: Naponski ofset je jednosmerni napon koji treba dovesti između ulaznih priključaka tako da jednosmerni napon na izlazu bude jednak nuli.

• **Uzrok**: Ovaj nedostak je posledica neuparenosti tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Kada tranzistori u diferencijalnom paru nemaju istu vrednost jednosmernog napona na ulazu, V_{BE}, prenosna karakteristika operacionog pojačavača ne prolazi kroz koordinatni početak.

Tipična vrednost: 1mV<*Vos*<5mV.

• **Model:**



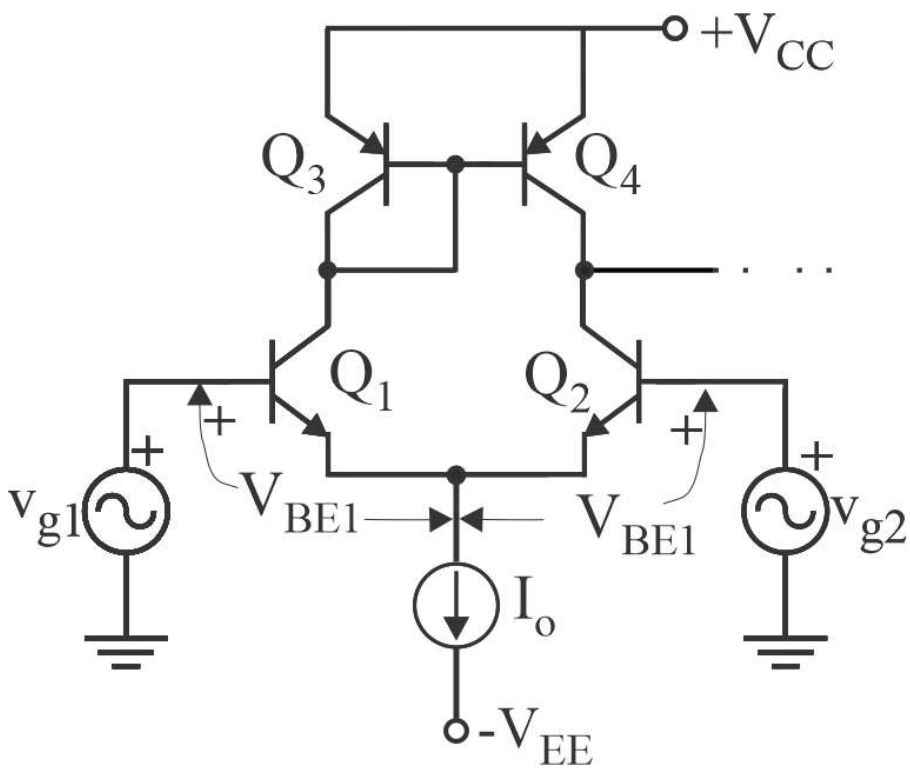


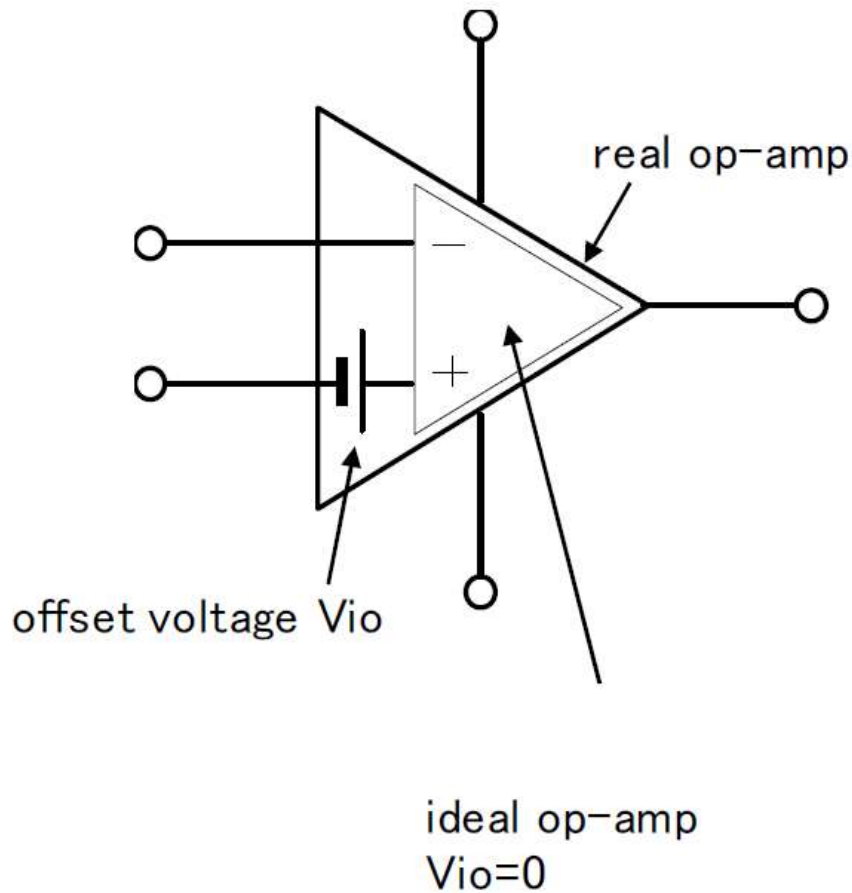
ideal op-amp
Vio=0

Realni operacioni pojačavač

Naponski ofset (razdešenost)

- Naponski ofset jednak je razlici jednosmernih napona na emitorskih spojeva tranzistora u diferencijalnom paru: $Vos=V_{BE1}-V_{BE2}$





Realni operacioni pojačavač

Naponski ofset (razdešenost)

- Naponska razdešenost nije konstantna vrednost već se menja u zavisnosti od spoljnjih uslova i signala.

- Naponski ofset menja se usled:
  1. promene temperature
  2. varijacija napona napajanja
  3. promene srednje vrednosti signala

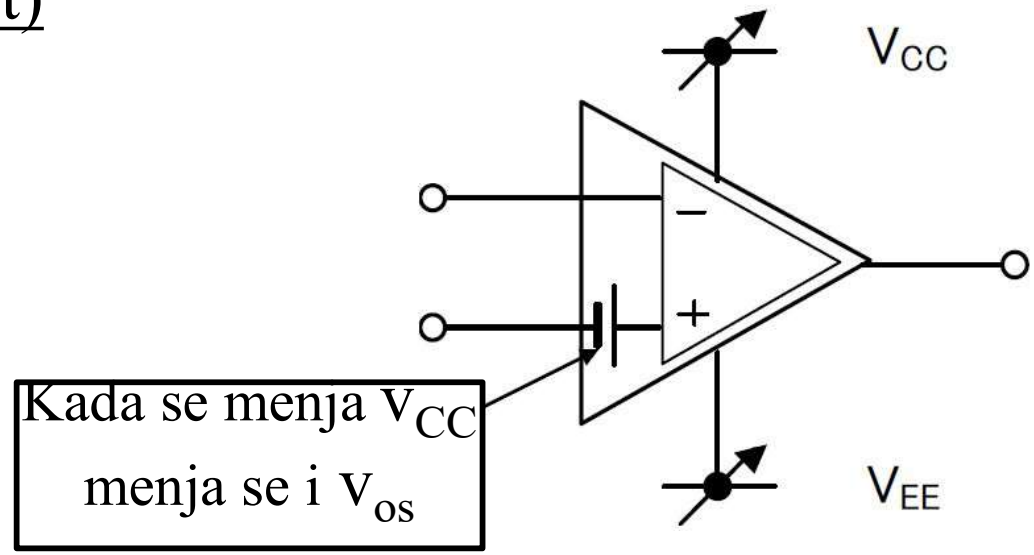
Naponski ofset se menja sa promenom temperature, zbog različitog stepena neuparenosti komponenti na različitim temperaturama. Ova pojava se kvantitativno izražava kao **temperaturni drift naponskog ofseta** $\Delta Vos/T$ [μV/°C].

Realni operacioni pojačavač

Naponski ofset (razdešenost)

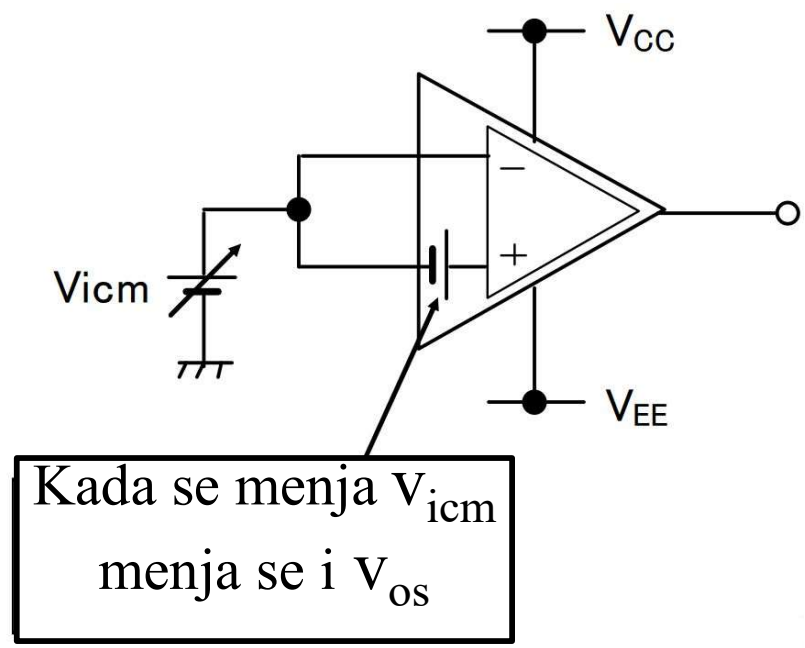
▪ **Faktor potiskivanja napona napajanja** PSRR pretstavlja odnos priraštaja napona napajanja i priraštaja ofseta napona koji je njime prouzrokovan.

$$PSRR = \frac{\Delta(V_{CC})}{\Delta V_{os}}$$



▪ **Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala** CMRR predstavlja odnos promene srednje vrednosti signala na ulazu ΔV_{icm} i varijacija naponskog ofseta koja ona prouzrokuje.

$$CMRR = \frac{\Delta V_{iCM}}{\Delta V_{os}}$$



Realni operacioni pojačavač

Strujni ofset (razdešenost)

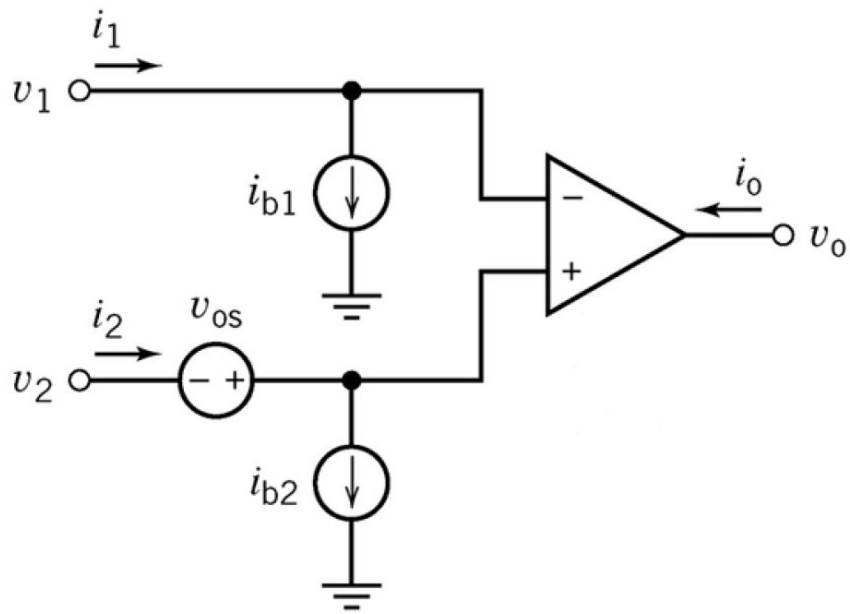
- **Definicija:** Struja razdešenosti na ulazu predstavlja razliku između ulaznih struja polarizacija, $Ios = I_{B1} - I_{B2}$.
- **Uzrok:** Ulazne struje su jednosmerne struje polarizacije bipolarnih tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Ove struje su kod MOSFET operacionih pojačavača ne postoje. Strujni ofset nastaje zbog nemogućnosti izrade dva tranzistora sa identičnim karakteristikama.

- **Tipične vrednosti za bipolarni O.P.**

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100\text{nA}$$

$$I_{OS} = \left| I_{B1} - I_{B2} \right| \leq 10\text{nA}$$

- **Modeliranje**

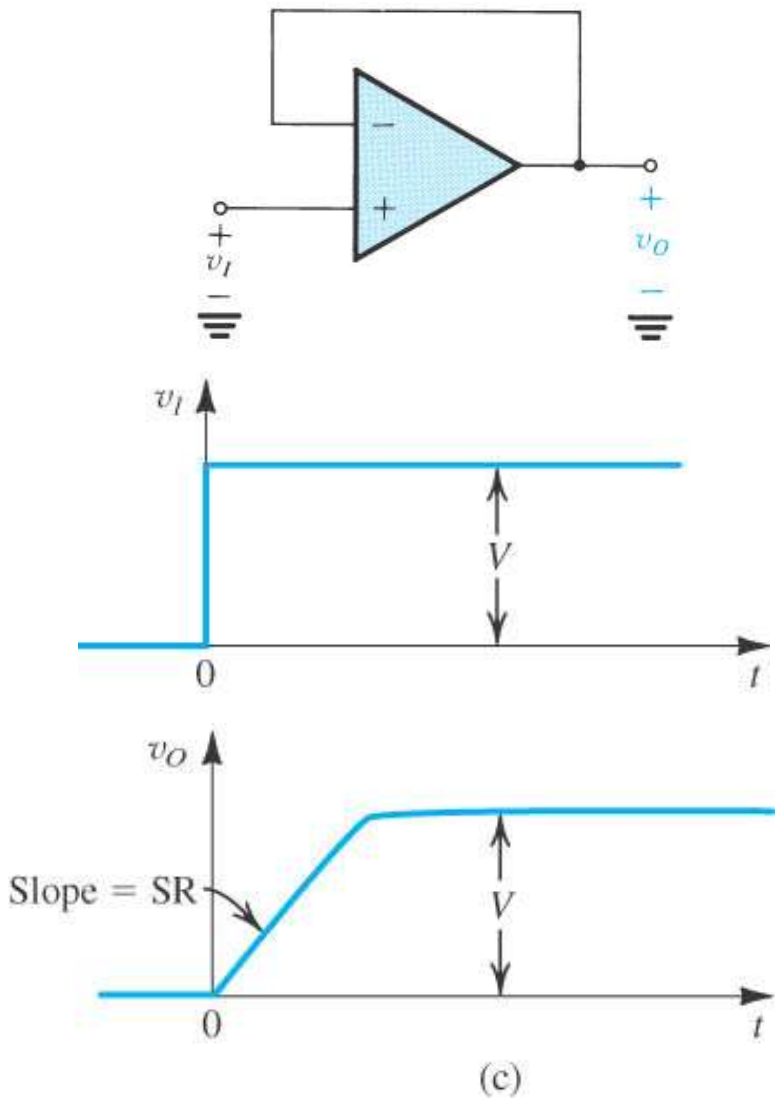


Realni operacioni pojačavač

Maksimalna brzina odziva (*Slew rate*)

Definicija: Maksimalna moguća brzina promene izlaznog napona operacionog pojačavača u vremenu.

$$SR = \frac{dv_o}{dt} \quad [\mathrm{V}/\mu\mathrm{s}]$$

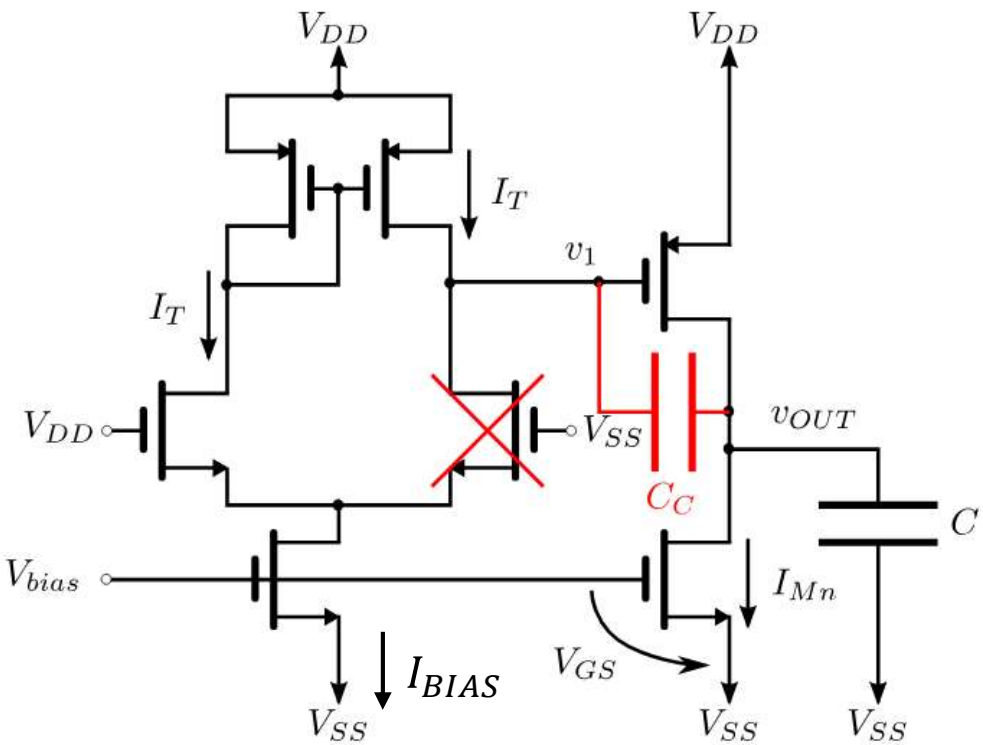


Uzrok: Nastaje usled ograničenih mogućnosti pojačavača da napuni ili isprazni internu kapacitivnost dovoljno velikom brzinom. Ova kapacitivnost se koristi za za podešavanje frekvencijskog odziva operacionog pojačavača.

Posledica: Ukoliko je u bilo kom trenutku brzina promene signala veća od SR javiće se nelinearna izobličenja.

Realni operacioni pojačavač

Maksimalna brzina odziva (*Slew rate*)

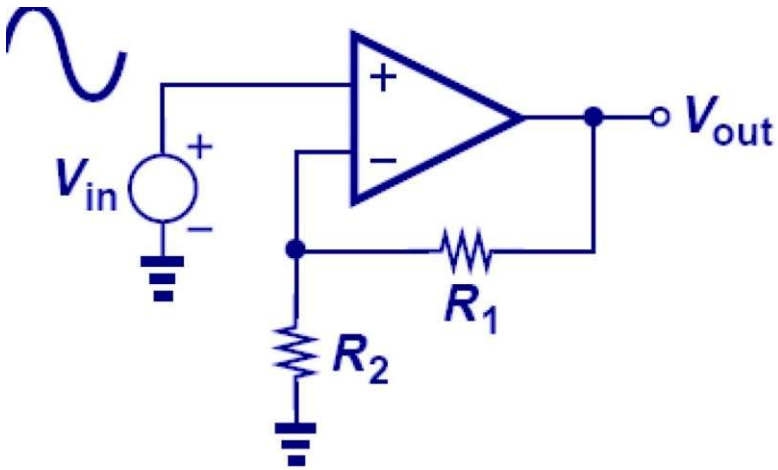


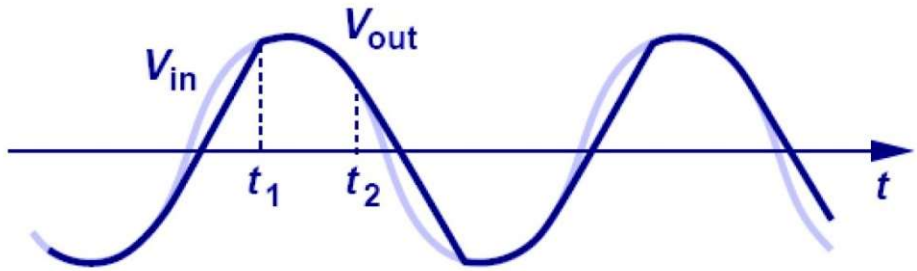
- Prilikom analize Slew-Rate na ulazu se dovodi veliki signal da bi se pratile velike promene izlaznog signala. U tom slučaju jedan od dva tranzistora u diferencijalnom paru će u jednom trenutku preći iz aktivnog režima u zakočenje dok će kroz drugi (levi tranzistor proticati sva struja strujnog izvora I_{BIAS}). Kapacitivnost C_C se tada puni maksinalnom brzinom koja iznosi:

$$SR = \max\left(\frac{dv_{out}}{dt}\right) = \frac{I_{BIAS}}{C_C}$$

Maksimalna brzina odziva (*Slew rate)*

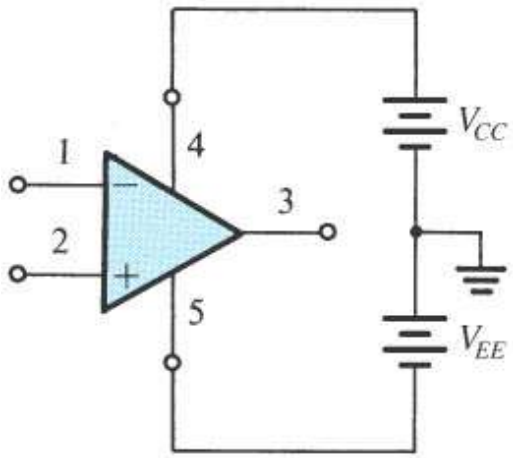
Ovaj nedostatak prouzrokuje nelinearna izobličenja signala u vremenskim intervalima kada je brzina promene signala veća od maksimalne brzinu odziva operacionog pojačavača (Slew rate). Za sinusni signal najveća brzina promene signala se pojavljuje u okolini nulte vrednosti napona. Ukoliko su frekvencija i amplituda signala dovoljno velike u ovim delovima periode pojaviće se izobličenja koja se manifestuju kao linearna promena napona.



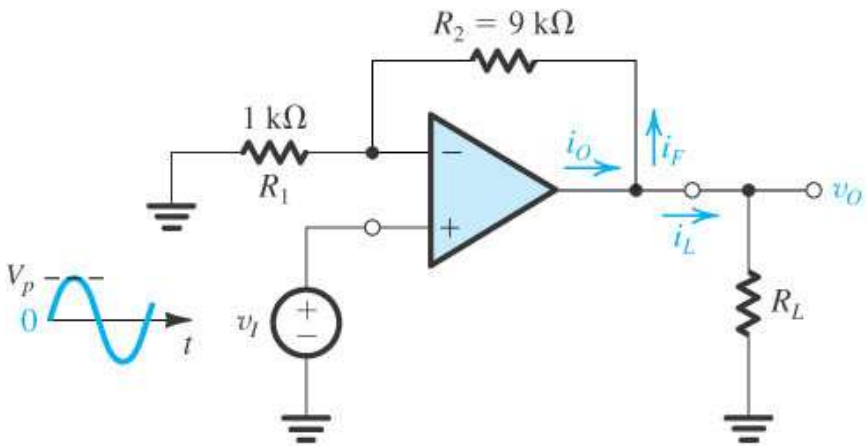


Maksimalna vrednost napona na izlazu

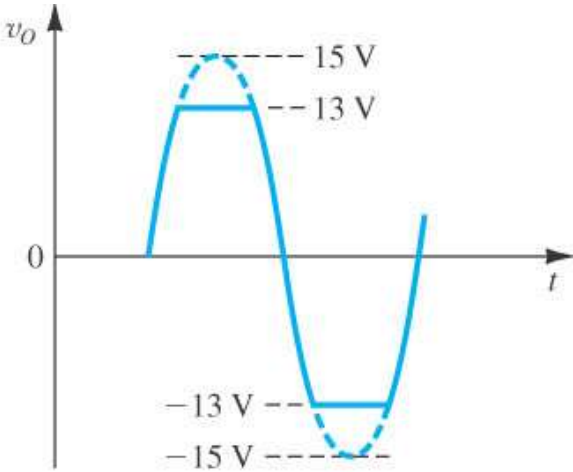
Napon na izlazu uvek je manji od pozitivnog i veći od negativnog napona napajanja. U kataloškim podacima navodi se maksimalna i minimalna vrednost napona na izlazu.



(b)



(a)



(b)

Ograničenja REALNIH OpAmp

1. Konačno sve što je kod idealnog ∞ ili 0:

Pojačanje (razlike) nije beskonačno ⇒ $v_u = v_i / A$

ulazna otpornost konačna ⇒ $i_u \neq 0$

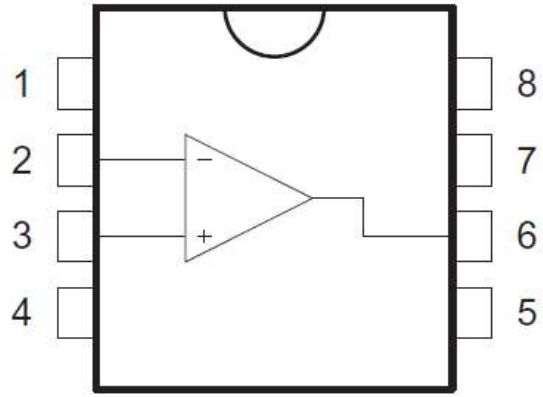
izlazna otpornost konačna ⇒ $V_i = f(R_p)$

pojačava *srednju vrednost* ⇒ $A_{cm} \neq 0$

propusni opseg konačan ⇒ ***realne f k-ke, uzan BW za otvorenu petlju***

Ograničenja REALNIH OpAmp

1. Naponska razdešenost (*V offset*) 1mV<V_{OS}<5mV
2. Struja polarizacije (*I bias*) $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100\text{nA}$
3. Strujna razdešenost (*I offset*) $I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \leq 10\text{nA}$
4. Potiskivanje napona napajanja $PSR = 20\log\left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d}\right] \leq 90dB$
5. *Slew rate* $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1\ \text{V}/\mu\text{s}$
8. Naponsko zasićenje ± |V_{CC}-2V|
9. Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) ~ x10mA



1 - Offset null 1
2 - Inverting input
3 - Non-inverting input
4 - V_{CC}^-
5 - Offset null 2
6 - Output
7 - V_{CC}^+
8 - N.C.

N
DIP8
(Plastic Package)

UA741

GENERAL PURPOSE SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	UA741M	UA741I	UA741C	Unit
V_{CC}	Supply voltage	±22			V
V_{id}	Differential Input Voltage	±30			V
V_i	Input Voltage	±15			V
P_{tot}	Power Dissipation 1)	500			mW
	Output Short-circuit Duration	Infinite			
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (Tj) is not exceeded.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
V_{CC} = ±15V, T_{amb} = +25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_s \leq 10k\Omega$) T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 6	mV
I_{io}	Input Offset Current T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 70	nA
I_{ib}	Input Bias Current T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100 200	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain (V_o = ±10V, R_L = 2kΩ) T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_s \leq 10k\Omega$) T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77 77	90		dB
I_{CC}	Supply Current, no load T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8 3.3	mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	±12 ±12			V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S \leq 10k\Omega$) T_{amb} = +25°C $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	90		dB
I_{OS}	Output short Circuit Current	10	25	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing T_{amb} = +25°C R_L = 10kΩ R_L = 2kΩ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ R_L = 10kΩ R_L = 2kΩ	 12 10 12 10	 14 13		V
SR	Slew Rate V_i = ±10V, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF, unity Gain	0.25	0.5		V/µs
t_r	Rise Time V_i = ±20mV, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF, unity Gain		0.3		µs
K_{ov}	Overshoot V_i = 20mV, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF, unity Gain		5		%
R_i	Input Resistance	0.3	2		MΩ
GBP	Gain Bandwith Product V_i = 10mV, R_L = 2kΩ, C_L = 100pF, f =100kHz	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2kΩ, V_o = $2V_{pp}$, C_L = 100pF, T_{amb} = +25°C		0.06		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage f = 1kHz, R_s = 100Ω		23		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
Øm	Phase Margin		50		Degrees

Operacioni pojačavač

Elementarna pitanja

1. Karakteristike idealnog operacionog pojačavača (14).
2. Struktura operacionog pojačavača (5).
3. Prenosna karakteristika idealnog i realnog operacionog pojačavača, posledica beskonačnog pojačanja idealnog operacionog pojačavača (9,11,12).

Ostala ispitna pitanja

4. Invertorski i neinvertorski pojačavač (električne šeme, naponsko pojačanje, ulazna i izlazna otpornost) (17-19, 23-25).
5. Kolo za diferenciranje/integraljenje (električna šema, prenosna karakteristika u s domenu) (37,38,41,42).
6. Balansni diferencijalni pojačavač (29,30,31).
7. Instrumentacioni pojačavač (električna šema, osobine, izraz za pojačanje) (34,35).
8. Logaritamski pojačavač (44,45).
9. Naponska razdešenost operacionog pojačavača (PSRR, CMRR, termperaturni drift) (49,51,52).