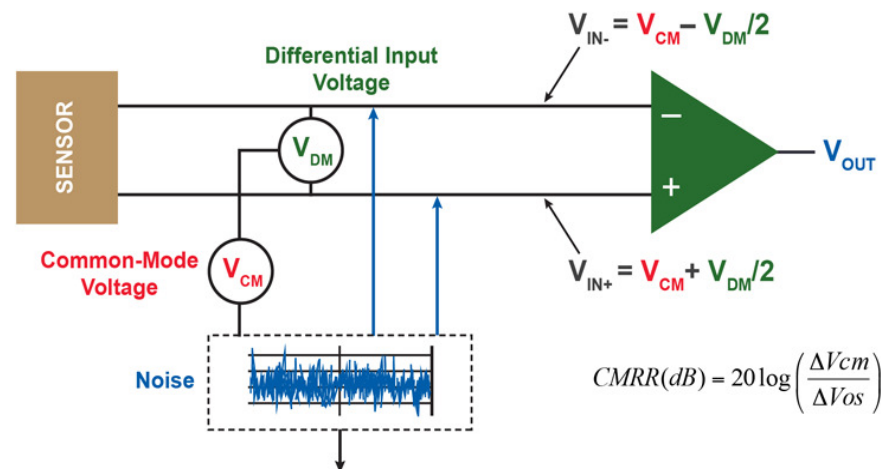


Instrumentacioni pojačavač

- **Instrumentacioni pojačavač** je tip diferencijalnog pojačavača sa diferencijalnim ulazom i asimetričnim izlazom koji unutar sebe sadrži povratnu spregu.
- **Namena:** Najčešće se primenjuje za kondicioniranje signala i pojačanje malih signala. Tipična primena je pojačanje signala koji se dobijaju na izlazu pretvarača neelektričnih veličina u električne signale - transdjusera. Performanse instrumentacionog pojačavača su optimizovane isključivo za akviziciju signala zbog čega ovo kolo nema veliku fleksibilnost primene.
- **Zahtevi:** Osnovna funkcija koju treba da ispuni instrumentacioni pojačavač je da istovremeno pojača veoma mali ulazni signal (reda mikro volta) i potisne znatno veći signal srednje vrednosti (reda volta).



Instrumentacioni pojačavač

▪ Odlike:

- Posедуje diferencijalni ulaz i asimetričan izlaz
- Velika vrednost faktora potiskivanja, čije su tipične vrednosti 70 do 100dB.
- Vrlo velika ulazna impedansa. Ulazne impedanse su balansirane (izjednačene) i imaju veoma velike vrednosti koje su tipično veće od $10^9 \Omega$.
- Vrlo mala izlazna impedansa, koja je reda nekoliko $m\Omega$.
- Male ulazne struje polarizacije, čija se tipična vrednost kreće od 1 nA do 50 nA

Odlike instrumentacionog pojačavača po kojima se razlikuje od OP:

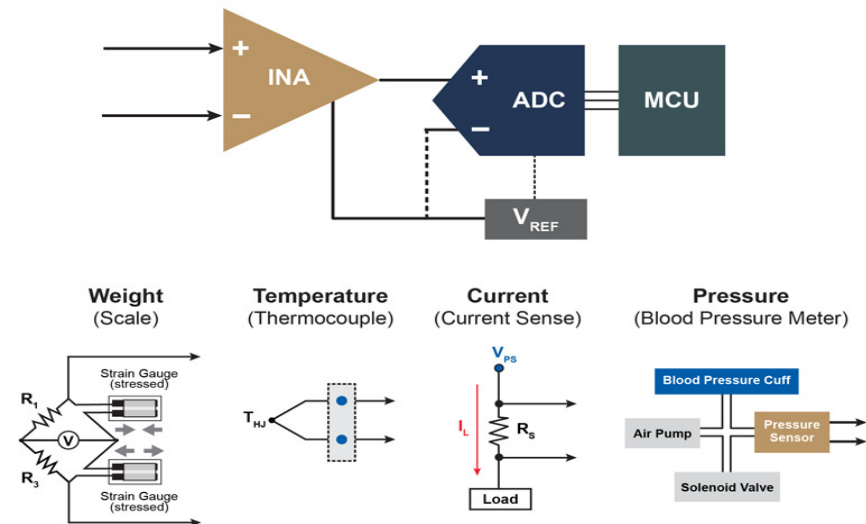
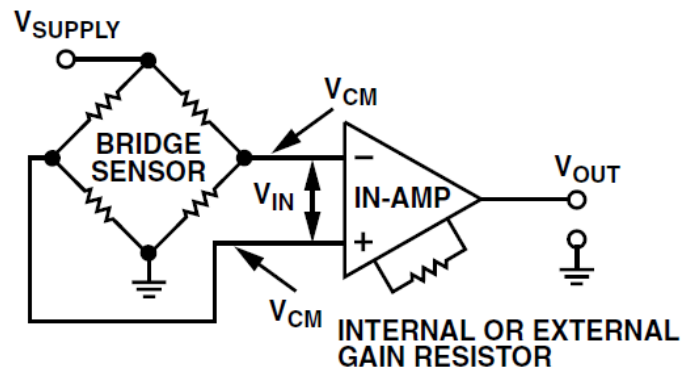
- Primenuje internu povratnu spregu koja se realizuje otpornom mrežom.
- Pojačanje nije veliko, promenljivo je i reguliše se spoljnim otpornikom RG.
- Namenjen je isključivo pojačanju diferencijalnog signala.

Prednosti instrumentacionog pojačavača u primenama koje se odnose na akviziciju signala

- Kola sa standardnim operacionim pojačavačima koriste spoljne otpornike za realizaciju negativne povratne sprege. Za razliku od operacionog pojačavača instrumentacioni pojačavač je kolo sa zatvorenom petljom, odnosno sadrži negativnu povratnu unutar integrisanog kola. Kod ovog kola povratna sprega se realizuje unutrašnjim otpornicima odvojenim od ulaza. Ovakva struktura instrumentacionog pojačavača pruža veću vrednost faktor poriskivanja zahvaljujući činjenici da otpornosti unutar integrisanog kola imaju manju toleranciju u odnosu na spoljne otpornike.
- Instrumentacioni pojačavač uspešno potiskuje srednju vrednost DC ili AC signala za razliku od kola sa operacionim pojačavačem kod kojih je najčešće zajedno sa signalom pojačan DC signal i šum.
- Vrednost pojačanja instrumentacionog pojačavača se može menjati u širokom opsegu pomoću jednog otpornika a da to nema uticaj na faktor potiskivanja za razliku od kola sa operacionim pojačavačima.

Primene instrumentacionog pojačavača

- **Akvizicija podataka.** Instrumentacioni pojačavači se koristi za pojačavanje signala transdjusera (pretvarača neelektričnih veličina u električne signale). Njihova prednost posebno dolazi do izražaja kada je signal transdjusera niskog nivoa i sa izraženim prisustvom šuma. Neke od primena su merenja pritiska, napreznaja, temperature. Ovi transdjuseri se često koriste u kombinaciji sa otpornu mrežom u obliku mosta.



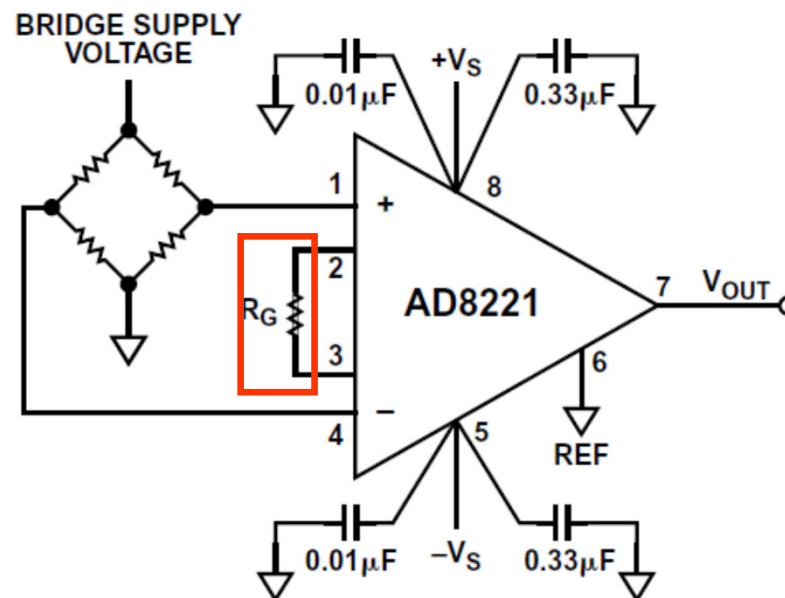
Primene instrumentacionog pojačavača

- **Medicinska instrumentacija.** Instrumentacioni pojačavači se široko primenjuju u medicinskim uređajima kao što su EKG i EEG monitori, monitori krvnog pritiska itd.
- **Softver-programabilne aplikacije.** Instrumentacioni pojačavači se mogu koristiti u kombinaciji sa programabilnim čipovima za softversku kontrolu hardverskog sistema.
- **Audio aplikacije.** Zahvaljujući svojim dobrim osobinama mogu se koristiti za izdvajanje slabog signala u prisustvu izraženog šuma.
- **Video aplikacije.** Instrumentacioni pojačavači primenjuju se i za akviziciju video podataka. Za ove namene primenjuju se instrumentacioni pojačavači sa širokim propusnim opsegom.
- **Monitoring i kontrola.** Mogu se koristiti za monitoring rada motora praćenjem struja i napona.

Karakteristike instrumentacionog pojačavača

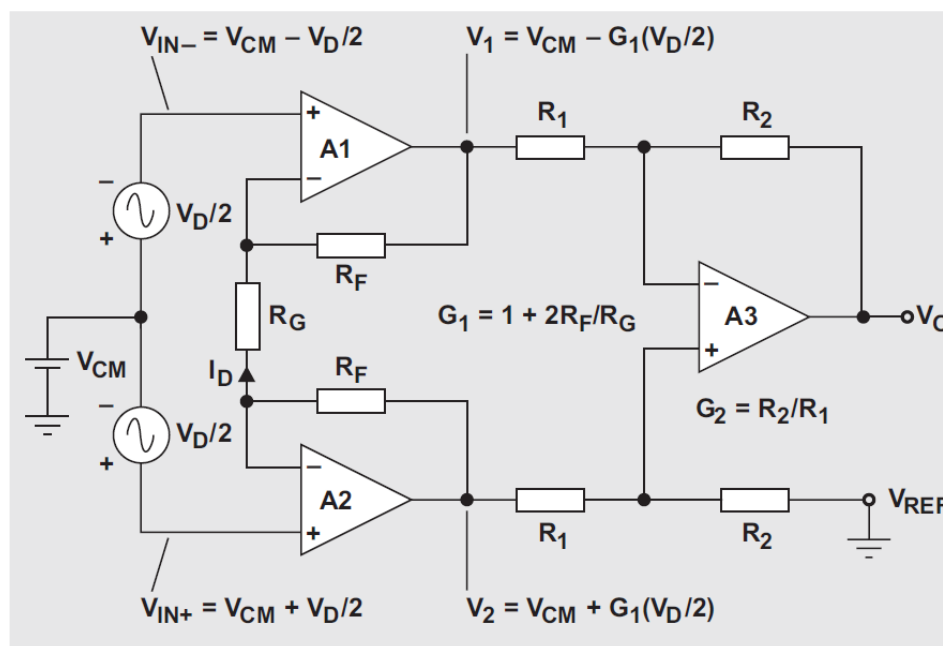
- **Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala.** Ovo je najznačajnija karakteristika instrumentacionog pojačavača. Neophodno je da CMR ima dovoljnu vrednost unutar frekvencijskog opsega signala koji se pojačava.
- **Ulazni ofset napon i temperaturni drift.** Ulazni ofset napon se može eliminisati primenom spoljnjeg trimera dok se temperaturni drift ne može eliminisati. Tipične vrednosti temperaturnog drifta su 1 do 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- **Ulazna impedansa.** Ulazne impedanse invertujućeg i neinvertujućeg ulaza moraju biti velike i podešene na približno jednake vrednosti (uparene). Ovo je neophodno da bi se izbeglo smanjenje nivoa signala na ulazu. Tipična vrednost ulazne otpornosti je 10^9 do $10^{12} \Omega$.
- **Struje polarizacije i ofset struje.** Struje polarizacije ulaznih bipolarnih tranzistora su neizbežne. One unose određenu grešku i nastoji se da budu što manje. Tipične vrednosti struja polarizacija kod bipolarnih pojačavača su 1nA do 50nA. Ukoliko je unutrašnja otpornost signala veoma velika ne mogu se normalno polarisati ulazni tranzistori i zato se paralelno sa ulazom vezuju velike otpornosti.

- Pojačanje se podešava promenjivim otpornikom koji je izolovan od ulaznog signala.
- Instrumentacioni pojačavač čije se pojačanje podešava softverski naziva se PGA pojačavač (*Programmable Gain Amplifier*).



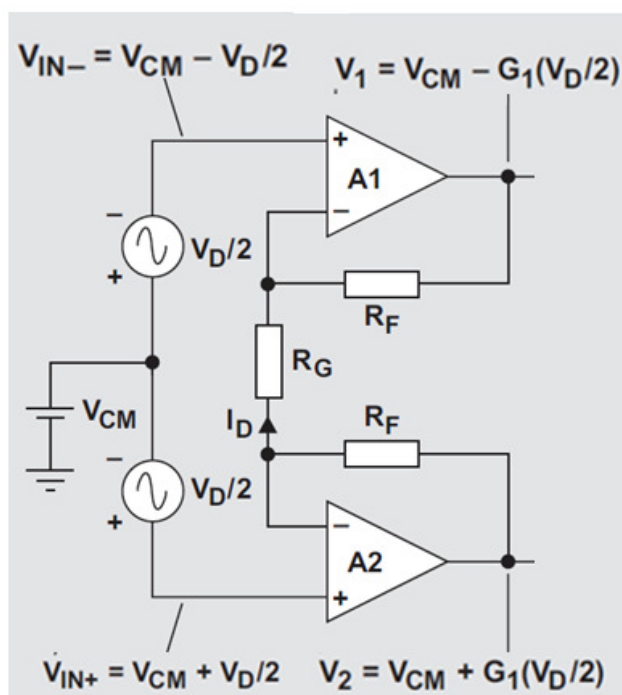
Instrumentacioni pojačavač realizovan sa tri operaciona pojačavača

- Ulazni stepen je sačinjen od dva operaciona pojačavača. Oba ova operaciona pojačavača su u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača. Predviđeno je da se pojačanje prvog stepena podešava pomoću promenljivog otpornika R_G .
- Drugi stepen čini diferencijalni pojačavač koji tipično ima pojačanje 1 ali može da ima i veće pojačanje.



Instrumentacioni pojačavač realizovan sa tri operaciona pojačavača

Ukoliko je pobuda simetrična, $V_{IN+} = V_{IN-}$, ne teče struja kroz otpornike u prvom stepenu, R_F i R_G . Napon na izlazu oba operaciona pojačavača jednak je naponu na ulazu.



$$\frac{V_{IN-} - V_{IN+}}{R_G} + \frac{V_{IN-} - V_{o1}}{R_1} = 0$$

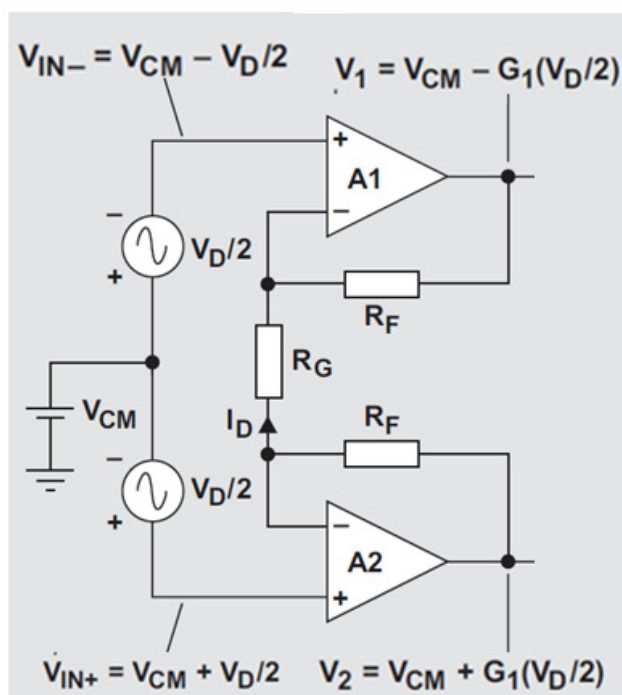
$$\frac{V_{IN+} - V_{IN-}}{R_G} + \frac{V_{IN+} - V_{o2}}{R_2} = 0$$

$$V_{IN+} = V_{IN-} = V_{CM} \Rightarrow V_{o1} = V_{IN-} \quad V_{o2} = V_{IN+}$$

- Pojačanje srednje vrednosti signala jednako je jedinici.

Instrumentacioni pojačavač realizovan sa tri operaciona pojačavača

Napon na izlazu operacionih pojačavača u prvom stepenu instrumentacionog pojačavača V1 i V2 mogu se odrediti iz sledećeg sistema jednačina:



$$I_D = \frac{V_{IN+} - V_{IN-}}{R_G} = \frac{V_D}{R_G}$$

$$V_1 = V_{IN-} - I_D \cdot R_F$$

$$V_2 = V_{IN+} + I_D \cdot R_F$$

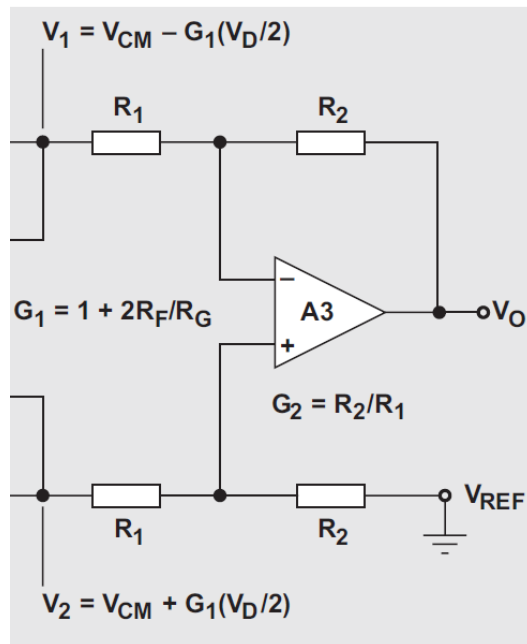
$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} G_1 \quad V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} G_1$$

Gde je G_1 pojačanje prvog stepena

koje iznosi: $G_1 = 1 + 2 \cdot \frac{R_F}{R_G}$

Instrumentacioni pojačavač realizovan sa tri operaciona pojačavača

- Drugi pojačavački stepen pretstavlja diferencijalni pojačavač. Realizovan je upotrebom jednog operacionog pojačavača, A3, i dva para otpornika R1 i R2. Pojačanje ovog stepena iznosi $-\frac{R_2}{R_1}$.
- Vrednosti otpornika se najčešće biraju tako da pojačanje iznosi 1.



$$V_+ = V_2 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_- = V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_o = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Faktor potiskivanja instrumentacionog pojačavača

Faktor potiskivanja instrumentacionog pojačavača

Faktor potiskivanja diferencijalnog pojačavača zavisi pre svega od tolerancija upotrebljenih otpornika. Doprinos operacionog pojačavača pojačanju srednje vrednosti je zanemariv. Da bi se osigurala veća vrednost faktora potiskivanja ove otpornosti se realizuju unutar integrisanog kola.

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

α je odnos otpornosti dva para otpornika. Razmotrimo kako tolerancije otpornika utiču na pojačanje srednje vrednosti signala. R'_1, R'_2, R'_3, R'_4 su realne vrednosti otpornika. Sa je ε označena tolerancija otpornika.

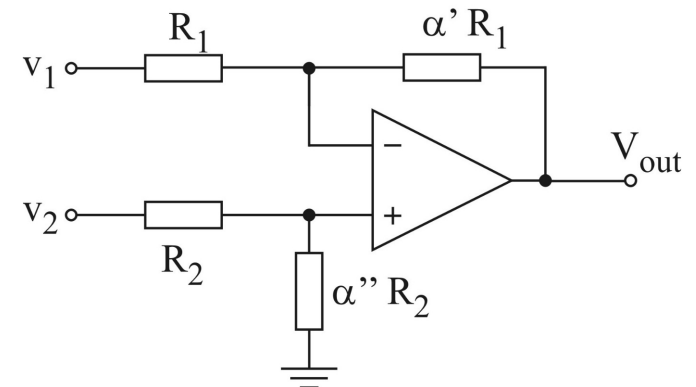
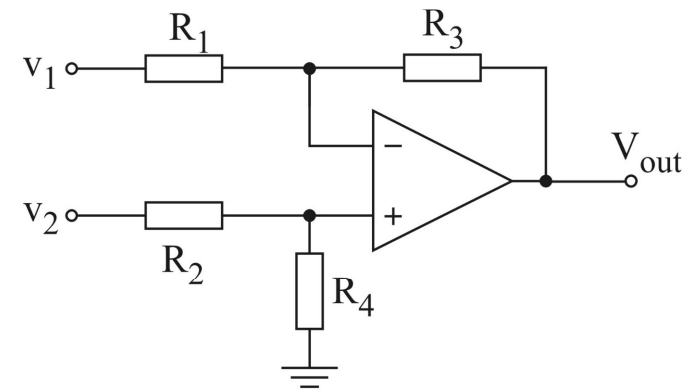
$$\alpha' = \frac{R'_3}{R'_1} = \frac{R_3(1 \pm \varepsilon)}{R_1(1 \pm \varepsilon)} = \alpha \cdot \frac{(1 \pm \varepsilon)}{(1 \pm \varepsilon)}$$

$$\alpha'' = \frac{R'_4}{R'_2} = \frac{R_4(1 \pm \varepsilon)}{R_2(1 \pm \varepsilon)} = \alpha \cdot \frac{(1 \pm \varepsilon)}{(1 \pm \varepsilon)}$$

$$\varepsilon \ll 1$$

$$\alpha' = \alpha \cdot \frac{(1 \pm \varepsilon)}{(1 \pm \varepsilon)} = \alpha \cdot \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} = \alpha \cdot \frac{1 - \varepsilon + 2\varepsilon}{1 - \varepsilon} \approx \alpha \cdot (1 + 2\varepsilon)$$

$$\alpha'' \approx \alpha \cdot (1 + 2\varepsilon)$$



Faktor potiskivanja instrumentacionog pojačavača

Tolerancija odnosa dva otpornika, α , jednaka je dvostrukoj vrednosti tolerancija otpornosti. Potrebno je utvrditi kako tolerancije otpornika utiču na pojačanje srednje vrednosti diferencijalnog pojačavača.

$$V_{out} = \frac{\alpha''}{1 + \alpha''} \cdot (\alpha' + 1) \cdot V_2 - \alpha' \cdot V_1$$

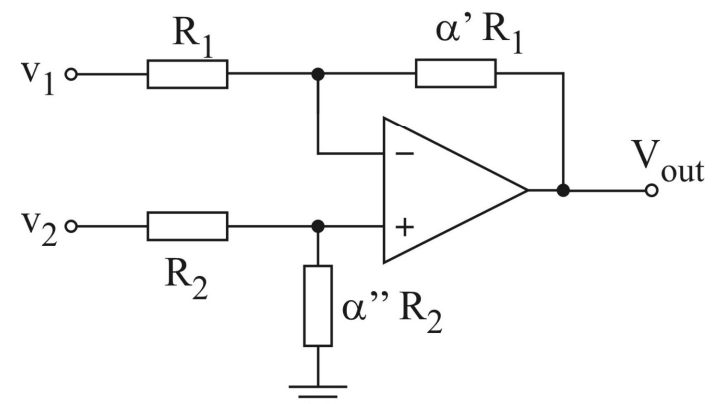
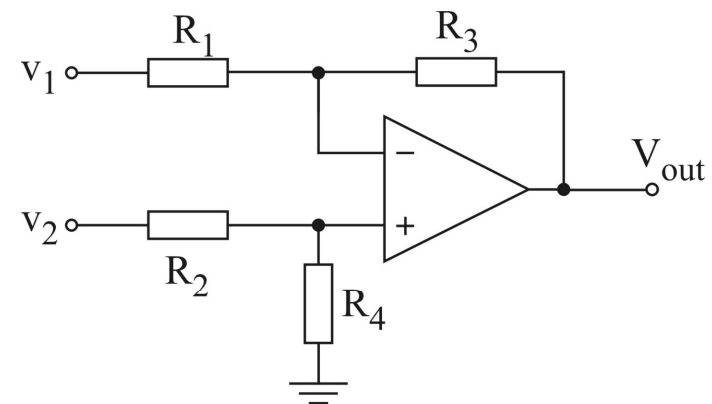
$$A_{CM} = \frac{V_{out}}{V_1} \Big|_{V_1 = V_2} = \frac{\alpha''}{1 + \alpha''} \cdot (\alpha' + 1) - \alpha'$$

$$A_{CM} = \frac{\alpha'' - \alpha'}{\alpha'' + 1}$$

$$\alpha' = \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)$$

$$\alpha'' = \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)$$

$$A_{CM} \approx \frac{\alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon) - \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)}{1 + \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)}$$



Faktor potiskivanja instrumentacionog pojačavača

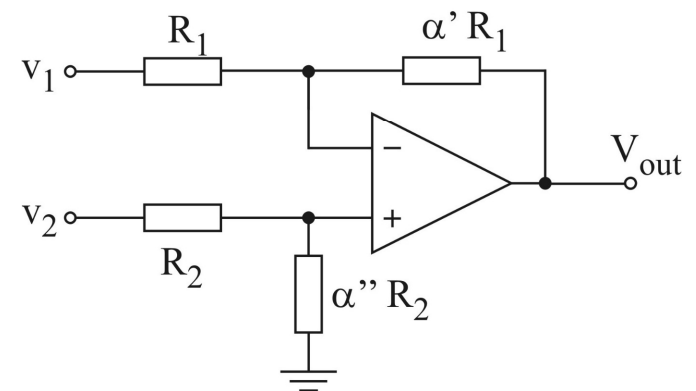
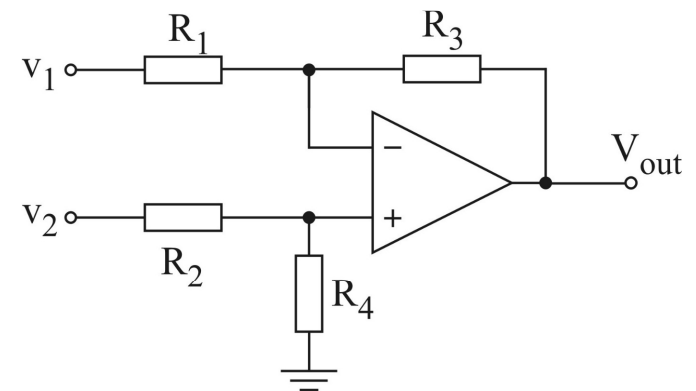
$$A_{CM} \approx \frac{\alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon) - \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)}{1 + \alpha \cdot (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)}$$

$$A_{CM} \approx \frac{\alpha}{1 + \alpha} \frac{(1 \pm 2 \cdot \varepsilon) - (1 \pm 2 \cdot \varepsilon)}{1 + \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 + \alpha}}$$

$$A_{CM} \approx \frac{A_d}{1 + A_d} \cdot 4 \cdot \varepsilon$$

$$A_d = 1 \Rightarrow A_{CM} \approx 2 \cdot \varepsilon$$

Pojačanje srednje vrednosti osim tolerancije komponentata zavisi i od diferencijalnog pojačanja. Sa povećanjem diferencijalnog pojačanja povećava se i pojačanje srednje vrednosti. Da bi se dobila veća vrednost Faktora potiskivanja usvaja se da je $A_d=1$. Pri jediničnom diferencijalnom pojačanju A_{cm} je srazmerno dvostrukoj vrednosti tolerancija otpornika ε .



Povećanje opsega srednje vrednosti ulaznog signala

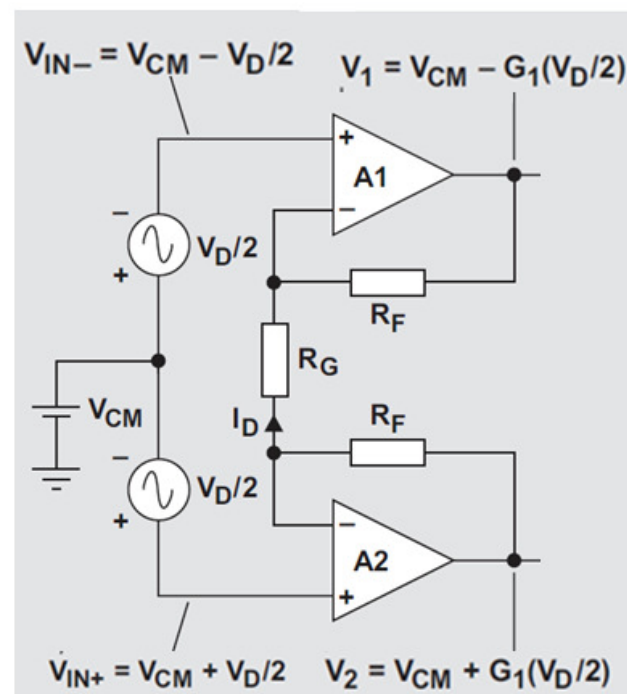
▪ Iako je srednja vrednost ulaznog signala potisnuta ova komponenta signala ne može biti neograničeno velika. Pri dovoljnoj vrednosti VCM operacioni pojačavači prvog stepena ulaze u zasićenje.

▪ Dozvoljeni opseg zajedničkog ulaznog napona može se odrediti iz izraza za napon na izlazima operacionih pojačavača, A1 i A2

$$|V_{1,2}| = \left(|V_{CM}| + G_1 \cdot \left| \frac{V_D}{2} \right| \right) \leq |V_{sat}|$$

▪ Odavde sledi da je povećanje dozvoljene vrednosti VCM moguće jedino ukoliko se smanji pojačanje ulaznog stepna G1.

$$V_{1,2} = const. = V_{CM} + \frac{V_D}{2} \cdot G_1 = V'_{CM} + \frac{V_D}{2} \cdot G'_1$$



Povećanje opsega srednje vrednosti ulaznog signala

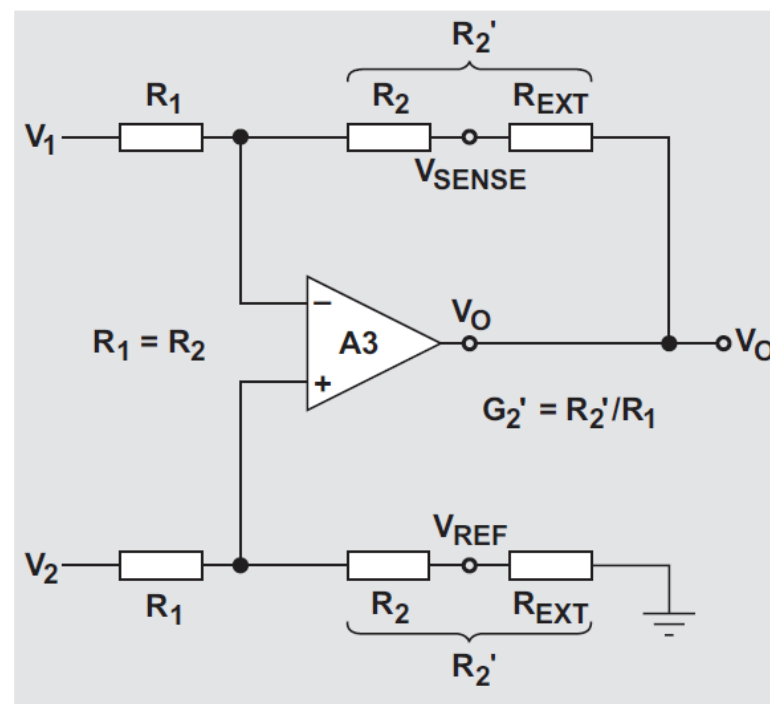
- Ukoliko se smanji pojačanje ulaznog stepena neophodno je uvesti dodatno pojačanje u izlaznom stepenu.

- U standardnom rešenju instrumentacionog pojačavača drugi pojačavački stepen ima pojačanje 1 odnosno usvaja se $R_1=R_2$.

- Najjednostavnije rešenje da se poveća pojačanje je da se usvoje drugačije vrednosti za otpornike u izlaznom pojačavačkom stepenu tako da važi:

$$G_2' = \frac{G_{TOT}}{G_1'} \quad G_2' = \frac{R_2'}{R_1}$$

- Neodstatak ovog rešenja je uvođenje velikih otpornosti u kolo pojačavača što ima za posledicu povećanje šuma.

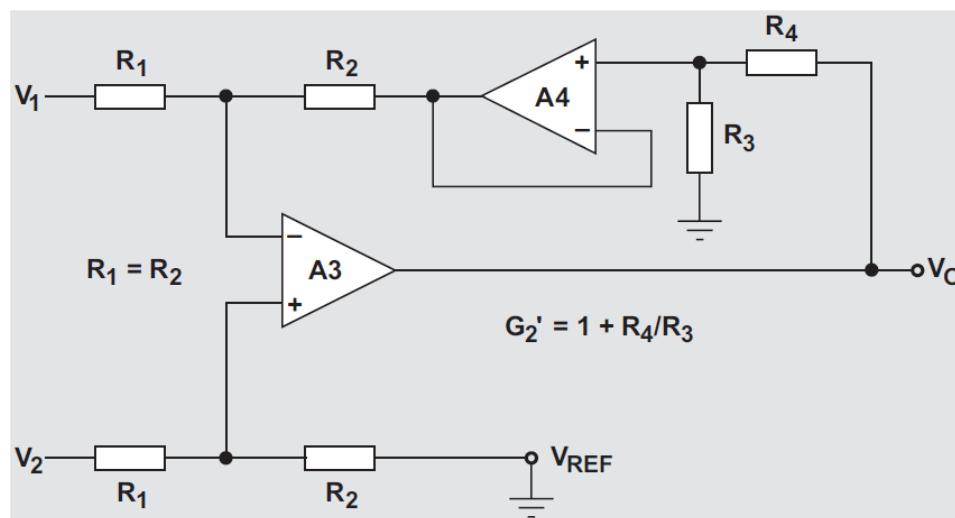


Povećanje opsega srednje vrednosti ulaznog signala

▪ Drugi način za povećanje **opsega srednje vrednosti signala** na ulazu je primena naponskog delitelja u povratnoj sprezi od izlaza do invertujućeg ulaza operacionog pojačavača A3.

▪ Izlazni napon ovog kola može se izraziti kao $V_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$

▪ Prednost ovog kola je da difrencijalno pojačanje zavisi od odnosa otpornika R3 i R4. Na ovaj način može se postići zadovoljavajuće pojačanje bez upotrebe velikih otpornosti. Mala izlazna otpornost bafera A4 omogućava održavanje visoke vrednosti CMRR.



Potiskivanje DC diferencijalnog napona

- U pojedinim primenama instrumentacionog pojačavača potrebno je umanjiti veliku vrednost DC diferencijalnog napona ulaznog signala. Primera radi u medicinskim merenjima se javlja DC diferencijalni napon koji je više stotina puta veći od AC diferencijalnog napona koji predstavlja koristan signal (reda mV).
- Neposredna primena aktivnog filtra pre instrumentacionog pojačavača nije dobro rešenje jer se na taj način umanjuje CMRR.
- Uticaj velike vrednosti DC diferencijalnog napona rešava se u sledeća tri koraka:
 1. Ograničavanje pojačanja ulaznog stepena G_1 da bi se izbegla pojava zasićenja u ulaznim operacionim pojačavačima A1 i A2.
 2. Primena filtra propusnika niskih frekvencija u izlaznom stepenu da bi se eliminisao diferencijalni DC signal.
 3. Primena većeg pojačanja u izlaznom stepenu da bi se povećao nivo naizmenične komponente signala.

Potiskivanje DC diferencijalnog napona

- Naponi na ulazima operacionog pojačavača mogu se izraziti kao :

$$V_n = \frac{V_1}{2} + \frac{V_0}{2} \cdot \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \qquad V_p = \frac{V_2}{2} - \frac{V_0}{2} \cdot \left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot R_{int} \cdot C_{int}} \right)$$

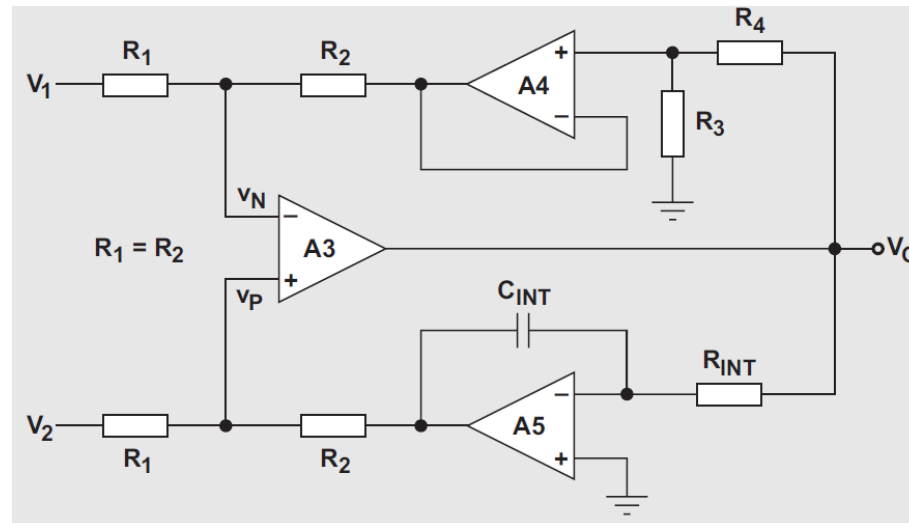
- Izjednačavanjem ova dva napona dobija se izraz za naponsko pojačanje izlaznog stepena:

$$V_n = \frac{V_0}{V_2 - V_1} = G_2 \cdot \left(\frac{j \frac{f}{f_0}}{1 + j \frac{f}{f_0}} \right)$$

Gde je:

$$G_2 = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$f_0' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{int} \cdot C_{int} \cdot G_2}$$

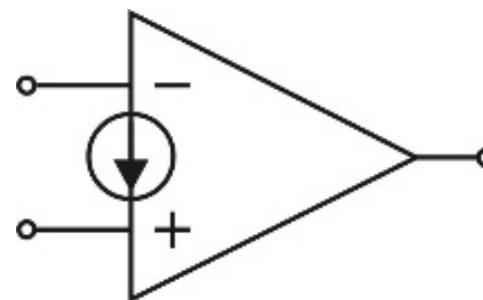
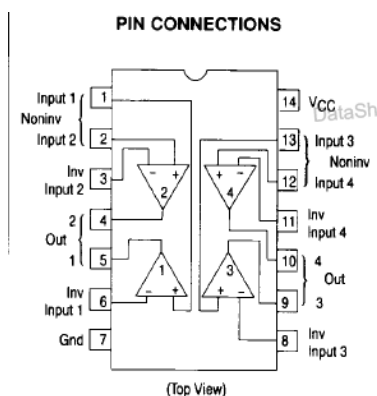
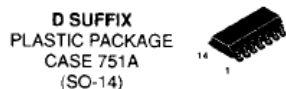


Nortronov operacioni pojačavač

Za razliku od standardnog operacionog pojačavača koji na izlazu generiše napon srazmeran razlici ulaznih napona, Nortonov operacioni pojačavač generiše na izlazu napon srazmeran razlici ulaznih struja. Ulazni stepen Nortonovog operacionog pojačavača realizovan je strujnim ogledalom.

Glavne odlike Nortonovog pojačavača su dobre karakteristike pri jednostrukom napajanju i niska cena. Ovi pojačavači imaju bolje karakteristike u odnosu na standardne operacione pojačavače sa jednostrukim napajanjem. Odlikuju ih veliki dinamički opseg signala na izlazu, veliki opseg srednje vrednosti signala na ulazu kao i širok frekvencijski opseg.

Najpoznatije intergrirano kolo Nortonovog operacionog pojačavača je LM3900. Drugo poznato integrisano kolo istog tipa LM359 namenjeno je obradi visokofrekvencijskih signala.



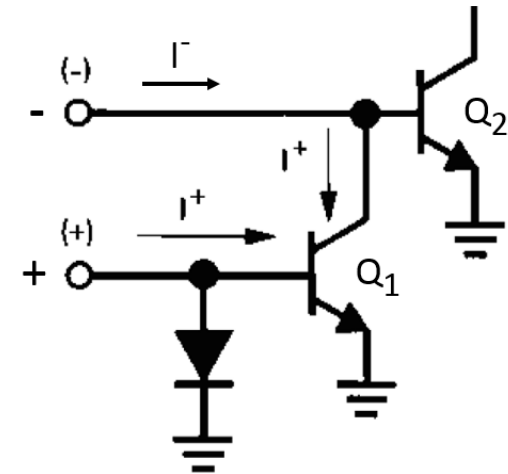
Nortronov operacioni pojačavač

Ulazni stepen Nortonovog pojačavača

Ulazni stepen Nortonovog pojačavača generiše signal srazmeran razlici ulaznih struja. Neinvertujući ulaz je povezan sa strujnim ogledalom čija je funkcija da struju koja utiče u neinvertujući ulaz oduzme od struje koja utiče u invertujući ulaz. Dobijena razlika ulaznih struja predstavlja ulaznu struju tranzistora Q2 u spoju sa zajedničkim emitorom. Izlazna struja tranzistora Q2, koja predstavlja uvećanu razliku ulaznih struja, pobuđuje naredni pojačavački stepen čija je uloga dalje pojačanje signala.

Napon na ulazima je približno konstantan i jednak vrednosti napona direktno polarisanog emitorskog pn spoja (oko 0,6 V). Da bi se obezbedila strujna pobuda pojačavača na red sa invertujućim i neinvertujućim ulazom vezuju se otpornici. Svrha ovih otpornika je da se konvertuju promene napona u promene struje.

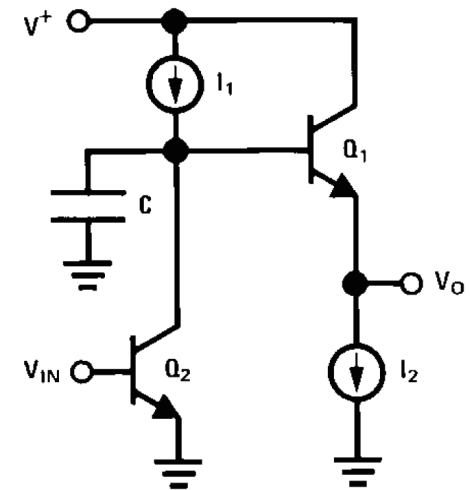
Ulazna impedansa Nortonovog pojačavača je dinamička otpornosti direktno polarisanog pn spoja V_T/I_{in} . Ova vrednost je veoma mala i menja se u zavisnosti od vrednosti ulazne jednosmerne struje.



Nortronov operacioni pojačavač

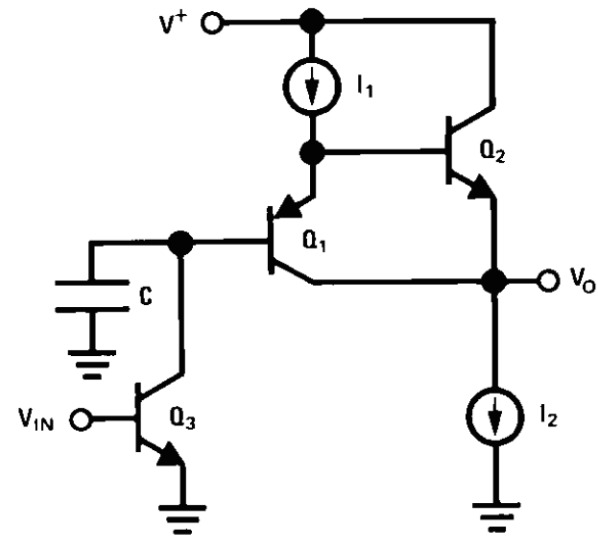
Pojačavački stepen Nortonovog pojačavača

Signal se pojačava pojačavačem u sprezi sa zajedničkim emitorom Q2. Da bi se dobilo veće pojačanje na izlaz ovog pojačavčkog stepna vezuje se izvor konstantne struje, i_1 , umesto otpornika. Poslednji pojačavački stepen je pojačavač u sprezi sa zajedničkim kolektorom čija je funkcija da izoluje otpornost potrošača od velike otpornosti u kolu kolektora pojačavačkog tranzistora Q2. Interna kapacitivnost C ima ulogu da obezbedi stabilan rad pojačavača na taj način što kreira dominantan pol u frekvencijskoj karakteristici. Ova kapacitivnost je reda nekoliko pikofarada. Osnovna konfiguracija pojačavača obezbeđuje dovoljno pojačanje kao i veliki dinamički opseg napona na izlazu. Jedini nedostatak je nedovoljno strujno pojačanje koje približno iznosi β^2 (Q1 pojačava struju β puta, a Q2 $\beta+1$). Da bi se istovremeno obezbedila dovoljno mala vrednost ulazne struje i dovoljno velika vrednost izlazne struje strujno pojačanje bi trebalo dodatno uvećati uvođenjem još jednog pojačavačkog stepena.



Nortronov operacioni pojačavač

Dodatno strujno pojačanje bi moglo da se obezbedi primenom Darlingtonove sprege tranzistora na ulazu ili izlazu. Međutim, takovo rešenje je nepoželjno jer bi Darlingtonova sprega na ulazu povećala vrednost jednosmernog ulaznog napona, dok bi Darlingtonov par na izlazu smanjio dinamički opseg izlaznog signala. U integrisanom kolu LM3900 dodatno strujno pojačanje realizovano je uvođenjem pnp tranzistorom Q1 koji je jednim svojim krajem povezan sa izlazom. Ovaj tranzistor praktično funkcioniše kao pojačavač u sprezi sa zajedničkim kolektorom i ne utiče značajno na smanjenje dinamičkog opsega izlaznog signala. Strujno pojačanje ovog kola je β^3 .



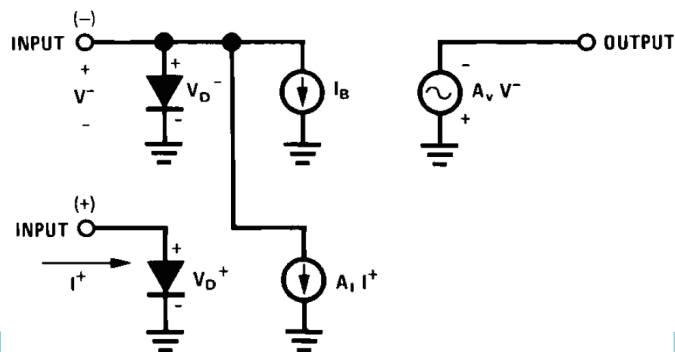
Nortronov operacioni pojačavač

Prednosti Nortonovog pojačavača u odnosu na standardni operacioni pojačavač

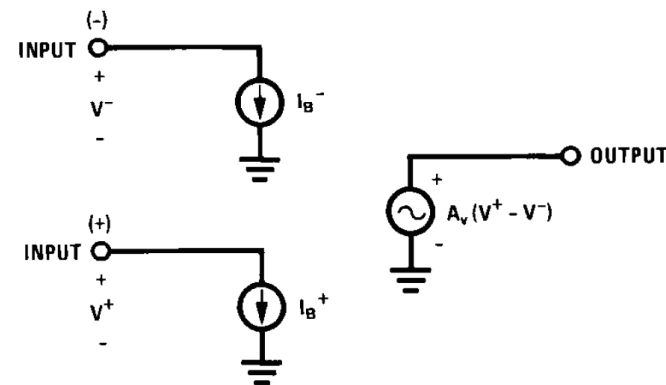
Jednosmerna komponenta ulaznog napona Nortonovog pojačavača ne zavisi od vrednosti signala. Ovaj napon se veoma malo menja i ima malu vrednost koja je jednaka naponu direktno polarisane diode. Pobuda Nortonovog pojačavača se realizuje pomoću otpornika koji se vezuju između izvora signala i ulaza. Uloga ovih otpornika je konvertovanje napona u struju. Zahvaljujući ovim svojstvima ovo kolo ima niz dobrih osobina.

- Mala vrednosti jednosmernog napona na ulazu omogućava da se izlazni tranzistori polarišu na takav način da se dobije velika dinamika izlaznog signala.
- S obzirom da se vrednost ulaznih struja može podešavati otpornicima vezanim za ulaze pojačavača proističe da je vrednost srednje vrednosti ulaznog napona praktično neograničena.
- Mogućnost da se od spolja podešavaju jednosmerne struje omogućava umanjuje uticaj struja polarizacije ulaznih tranzistora.

Model Nortonovog pojačavača za jednosmerni signal



Model operacionog pojačavača za jednosmerni signal



Nortronov operacioni pojačavač

Polarizacija Nortonovog pojačavača

Polarizacija Nortonovog pojačavača se realizuje preko neinvertujućeg ulaza. Jednosmerna struja koja utiče u neinvertujući ulaz se preko strujnog ogledala prenosi na invertujući ulaz. Ova struja stvara pad napona na otporniku u povratnoj sprezi, R_f , čime se uspostavlja željena vrednost jednosmernog napona na izlazu. Pri preciznijem proračunu jednosmernog izlaznog napona treba uzeti u obzir i struje baza ulaznih tranzistora, I_B . Ulazna struja na neinvertujućem ulazu, I_{IN+} , bi trebala da bude bar deset puta veća od ulaznih struja polarizacija I_B .

$$I^+ = \frac{V_r - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_r}{R_b}$$

$$I^- = A_i \cdot I^+ + I_{B-} \approx I^+$$

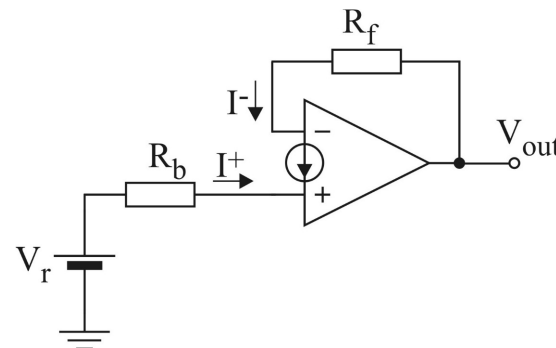
$$V_O = V_{BE} + I^- \cdot R_f \approx I^- \cdot R_f$$

$$A_i \approx 1$$

$$V_O \approx \frac{R_f}{R_b} \cdot V_r$$

za $R_f = \frac{R_b}{2} \quad V_O \approx \frac{V_r}{2}$

A_i je pojačanje strujnog ogledala koje je približno jednako 1.
Struje polarizacija I_B su reda nanoampera i obično se zanemaruju.
 V_r je najčešće napajanje celog kola.

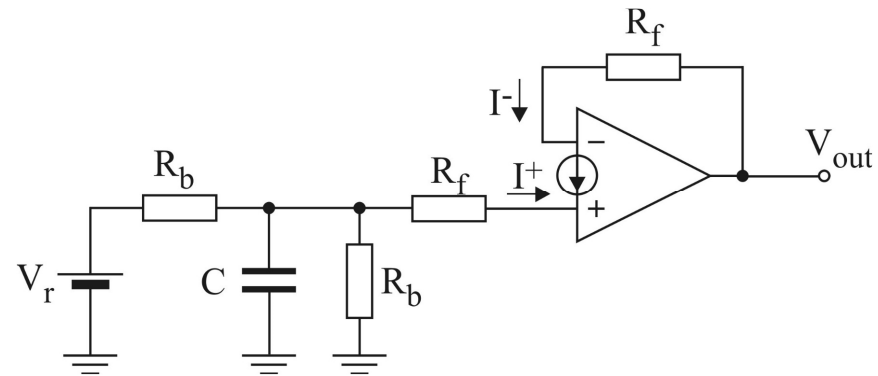


Nortronov operacioni pojačavač

Polarizacija Nortronovog pojačavača

Nedostatak prethodnog tipa polarizacije je da svaka promena napona napajanja prouzrokuje dvostruko veću promenu jednosmernog napona na izlazu pojačavača. Da bi se umanjio uticaj varijacija napona napajanja na ulazu se vezuje razdelnik napona koji treba da da polovinu vrednosti napona napajanja. Paralelno sa razdelnikom napona vezuje se kondenzator veće vrednosti da bi se jednosmerni napon dodatno filtrirao.

$$\begin{aligned} R_B &\gg R_f \\ I^+ &= \frac{\frac{V_r}{2} - V_{BE}}{R_f} \approx \frac{V_r}{2 \cdot R_f} \\ I^- &= A_i \cdot I^+ + I_{B-} \approx I^+ \\ V_{out} &= V_{BE} + I^- \cdot R_f \approx I^- \cdot R_f \\ V_{out} &\approx \frac{V_r}{2} \end{aligned}$$



Invertujući pojačavač realizovan Nortronovim operacionim

Invertujući pojačavač

Prilikom projektovanja invertujućeg pojačavača najpre se određuju komponente koje utiču na naizmenični napon R_1 , R_2 , C_{out} , C_{in} . Nakon toga se određuje vrednost otpornika povezanog sa neinvertujućim ulazom čija je funkcija polarizacija pojačavača. Naizmenična komponenta struje koja utiče u neinvertujući ulaz je jednaka nuli, pa će i naizmenična komponenta struje koja utiče u invertujući ulaz biti jednaka nuli. Usled velikog pojačanja i povratne sprege naizmenični napon na invertujućem ulazu će biti približno jednak nuli.

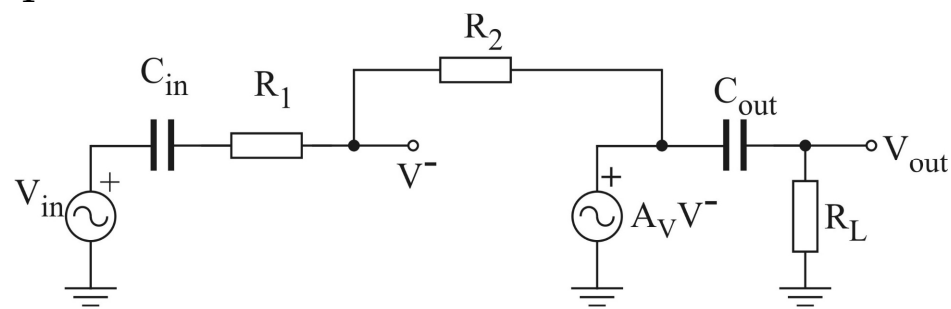
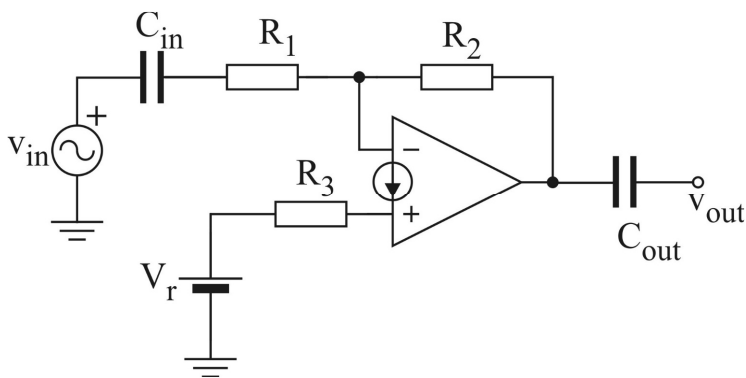
$$v^- = \frac{v_{out}}{A_v} \approx 0$$

$$v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_{in} + v^-$$

$$A_{CL} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Iz uslova da radna tačka bude na sredini aktivne oblasti rada dobija se:

$$R_3 = 2 \cdot R_2$$



Neinvertujući pojačavač realizovan Nortronovim operacionim

Neinvertujući pojačavač

Prilikom projektovanja invertujućeg pojačavača najpre se određuju komponente koje utiču na naizmenični napon R_1 , R_2 , C_{out} , C_{in} . Nakon toga se određuje vrednost otpornika R_3 čija je funkcija polarizacija pojačavača.

$$r_d || R_3 \approx r_d$$

$$i^- = A_i \cdot i^+ = A_i \cdot \frac{v_{in}}{R_1 + r_d}$$

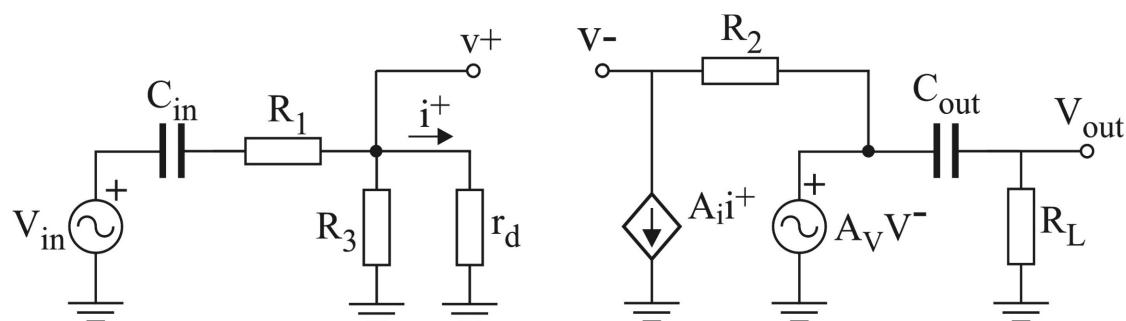
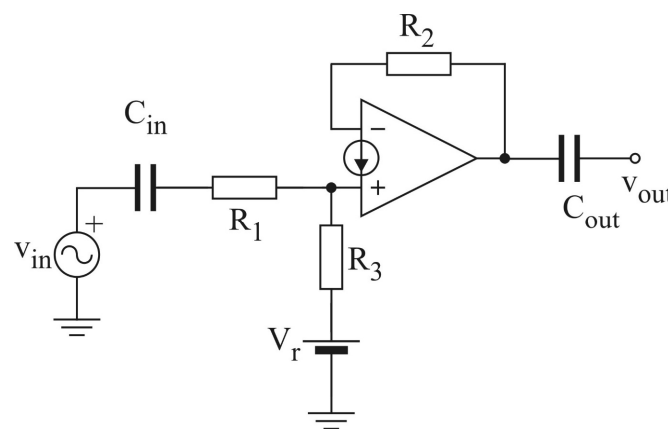
$$i^- \approx \frac{v_{in}}{R_1 + r_d}$$

$$v_{out} = R_2 \cdot i^-$$

$$A_{CL} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + r_d}$$

$$V_{out} \approx V_r \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

r_d je dinamička otpornost direktno polarisanog emitorskog pn spoja. Ova otpornost je tipično mnogo manja od otpornika R_1 .



Instrumentacioni pojačavač, Nortonov pojačavač

Osnovna pitanja

1. Odlike instrumentacionog pojačavača po kojima se razlikuje od standardnog operacionog pojačavača; Primene instrumentacionog pojačavača.
2. Instrumentacioni pojačavač realizovan sa tri operaciona pojačavača (električna šema).
3. Prednosti Nortnovog pojačavača u odnosu na standardni operacioni pojačavač; Model Nortnovog pojačavača za jednosmerni signal.

Ostala pitanja

1. Pojačanje prvog stepena instrumentacionog pojačavača (diferencijlano i pojačanje srednje vrednosti)
2. Proračun faktora potiskivanja instrumentacionog pojačavača.
3. Povećanje opsega srednje vrednosti ulaznog signala kod instrumentacionog pojačavača.
4. Ulazni stepen Nortonovog pojačavača.
5. Pojačavački stepen Nortonovog pojačavača.
6. Polarizacija Nortonovog pojačavača.
7. Neinvertujući i invertujući pojačavač realizovan Nortonovim pojačavačem.