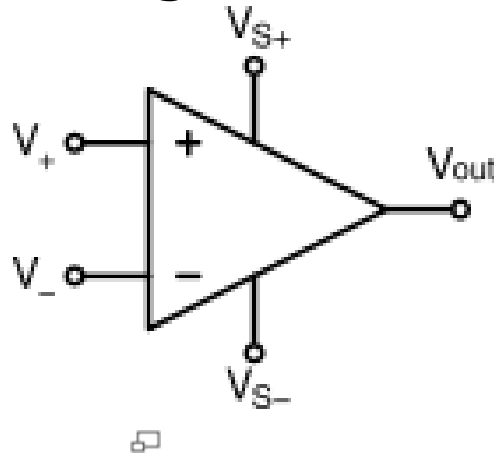




Operacioni pojačavači

Prof.dr.Zoran Mijanović

Šta je OP



- To je pojačavač visokog pojačanja za velike i male signale (DC i AC)
- Ima diferencijalne ulaze
- Obično ima jedan izlaz
- Visoka ulazna i mala izlazna otpornost
- Negativnom povratnom spregom se oblikuje prenosna karakteristika



Čemu služi



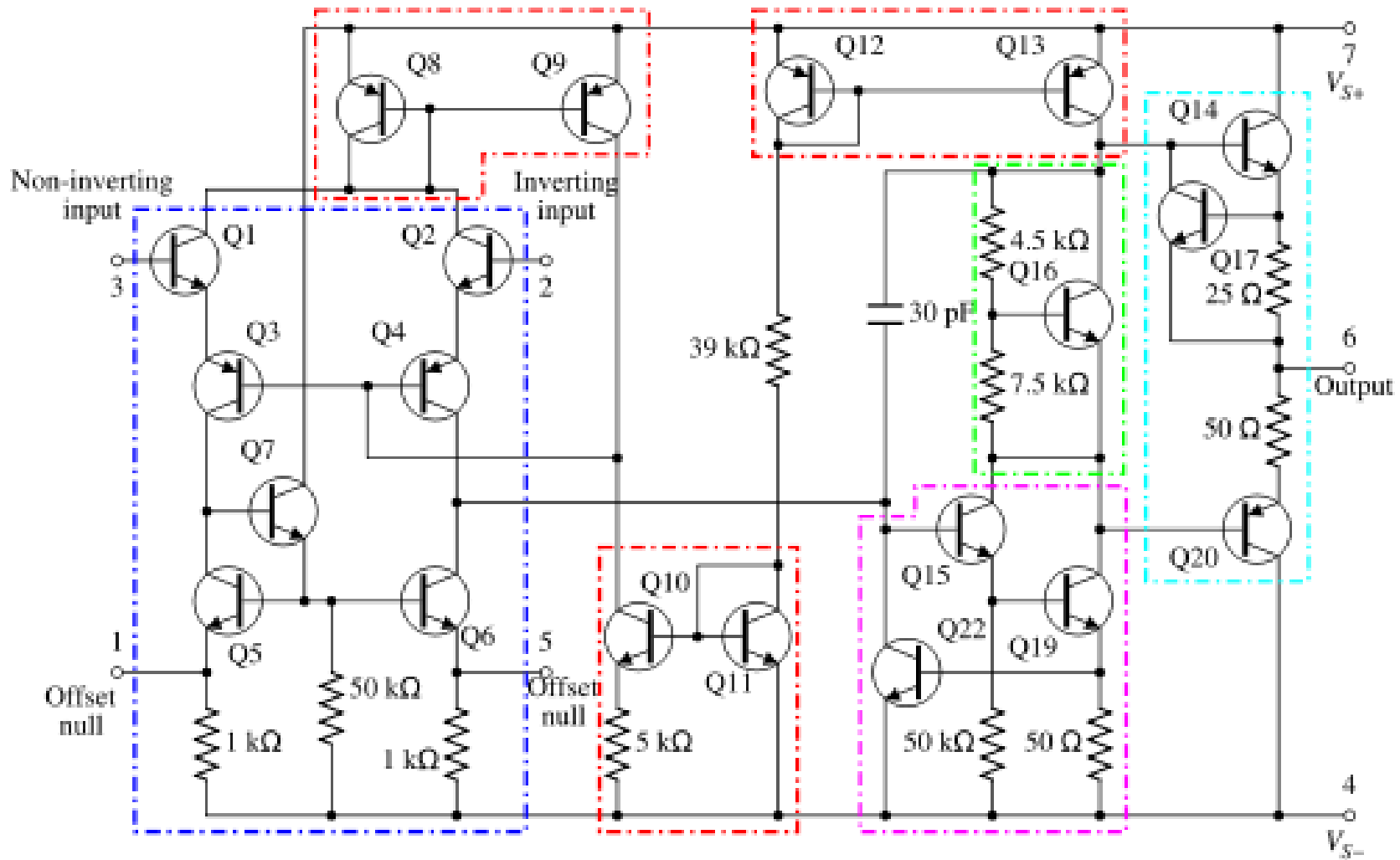
- Poređenje dva signala (komparator)
- Pojačanje signala
- Filtriranje signala
- Ostale obrade signala: sumiranje, diferenciranje, integraljenje, usrednjavanje, logaritmovanje, ...
- Linearni oscilatori (daju sinusoidu)
- Generisanje raznih talasnih oblika
- Koristi se u raznim drugim kolima: DA, AD konvertori, regulatori napona, detektori vrha,...



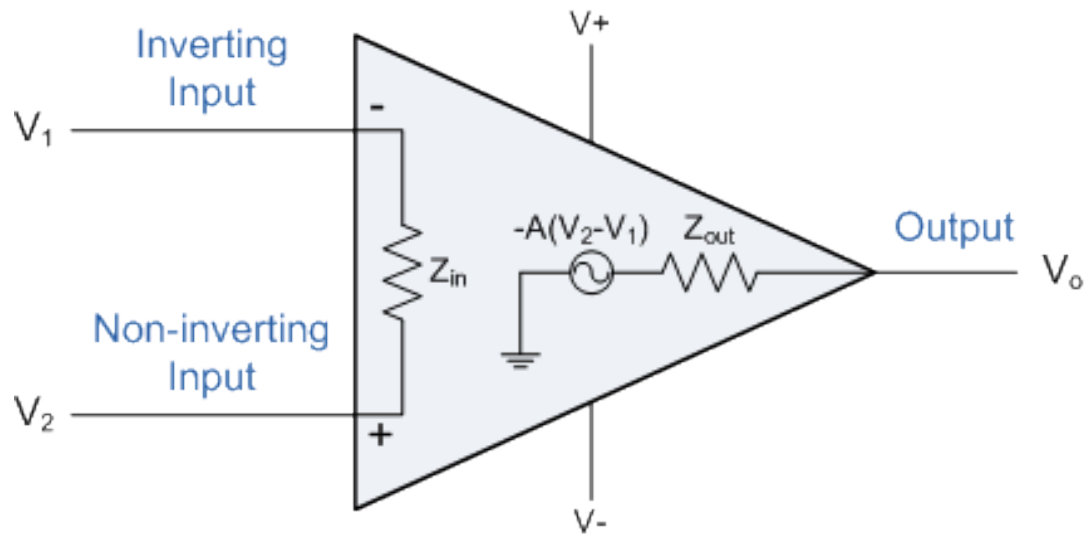
Kako izgleda



Unutrašnja struktura



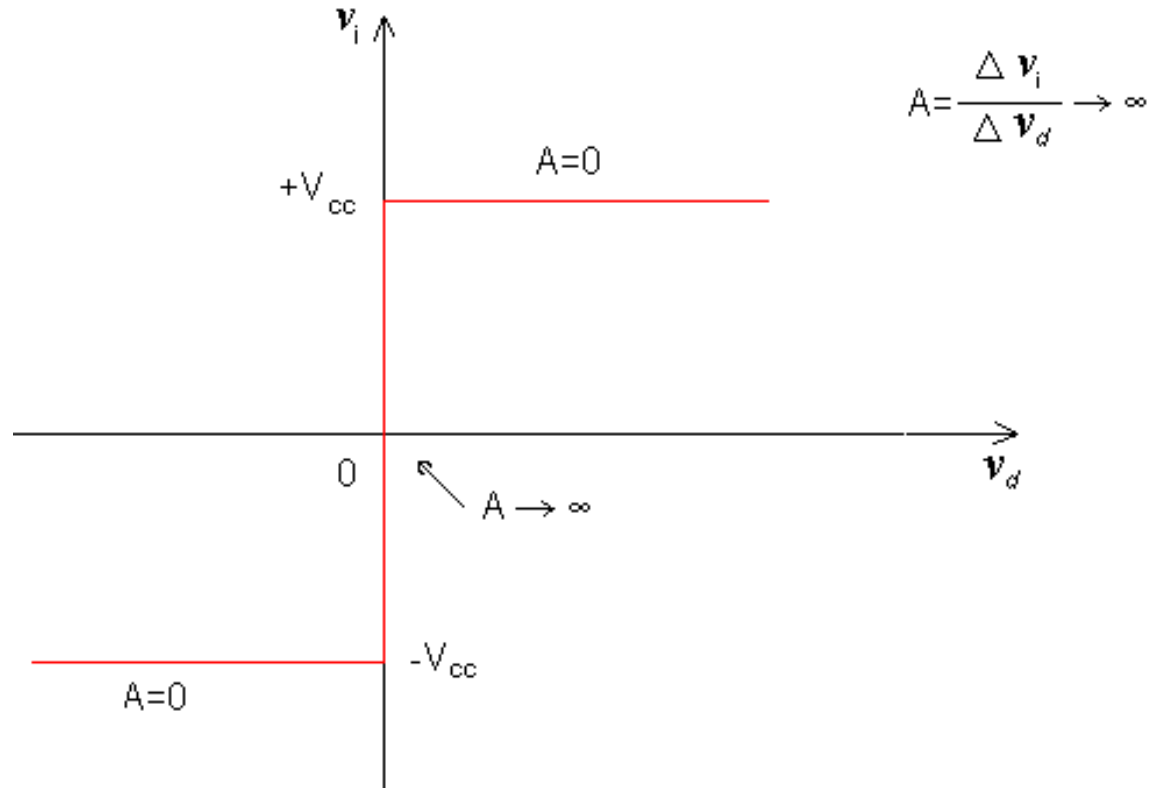
Idealni OP



- Ima beskonačno pojačanje $A \rightarrow \infty$
- Impedanse: $Z_{in} \rightarrow \infty$, $Z_{out}=0$
- Sve ostalo je idealno (frekvencijska k.ka, V_{os} , I_b , I_{os} , šum, I_{zmax} , CMRR, ...)
- Jedina nesavršenost, koja se ponekad uzima:
 - Izlazni napona je ograničen opsegom napajanja



Ulazno izlazna karakteristika



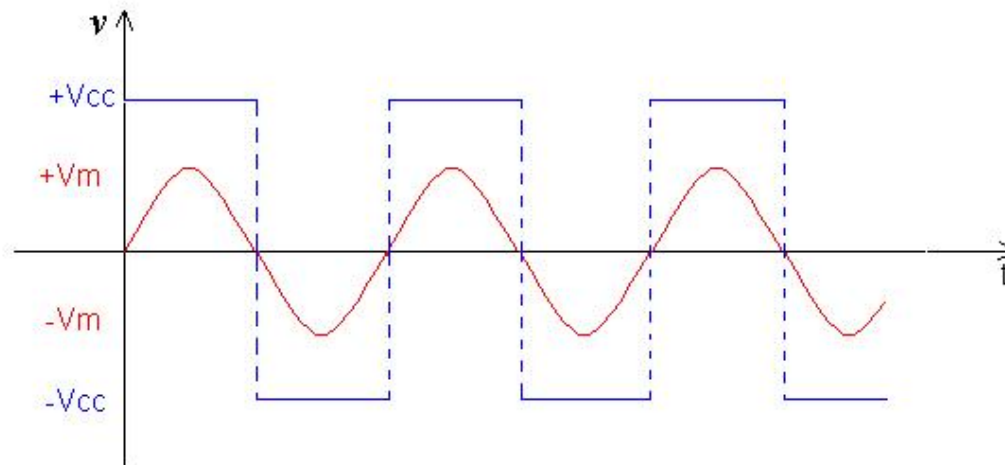
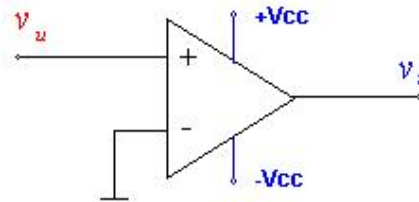
- Ako je $V_d > 0$, onda je $V_{iz} = +V_{cc}$
- Ako je $V_d < 0$, onda je $V_{iz} = -V_{cc}$
- Ako je V_{iz} između $-V_{cc}$ i $+V_{cc}$, onda je $V_d = 0$



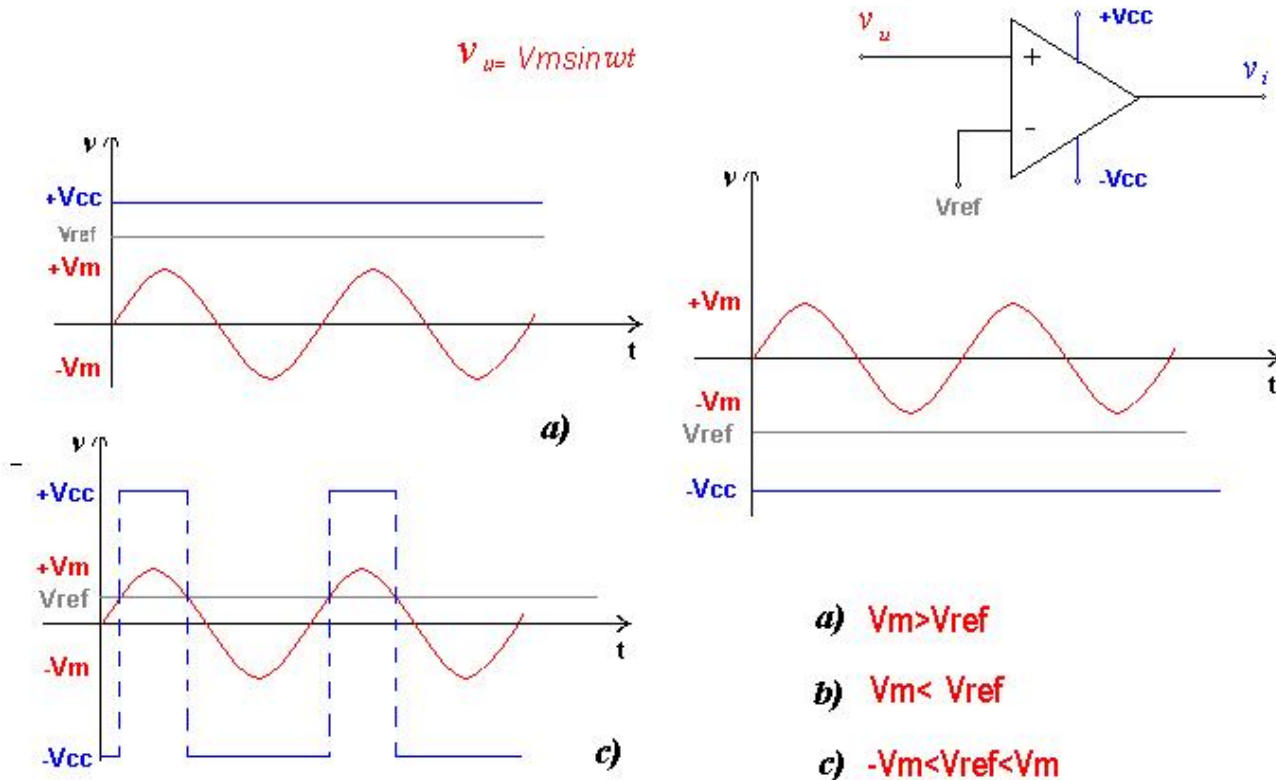
Komparator (upoređuje ulazni napon sa nulom)



$$v_u = V_m \sin \omega t$$

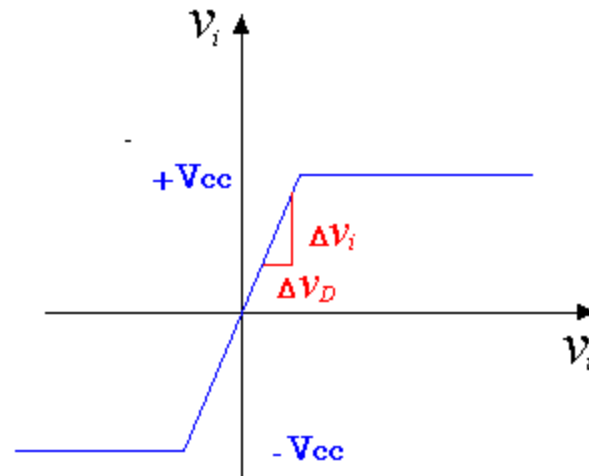


Komparator upoređuje sa V_{ref}



- Gdje je greška na slici?

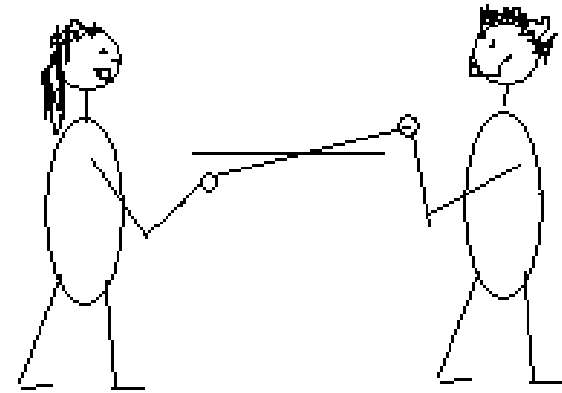
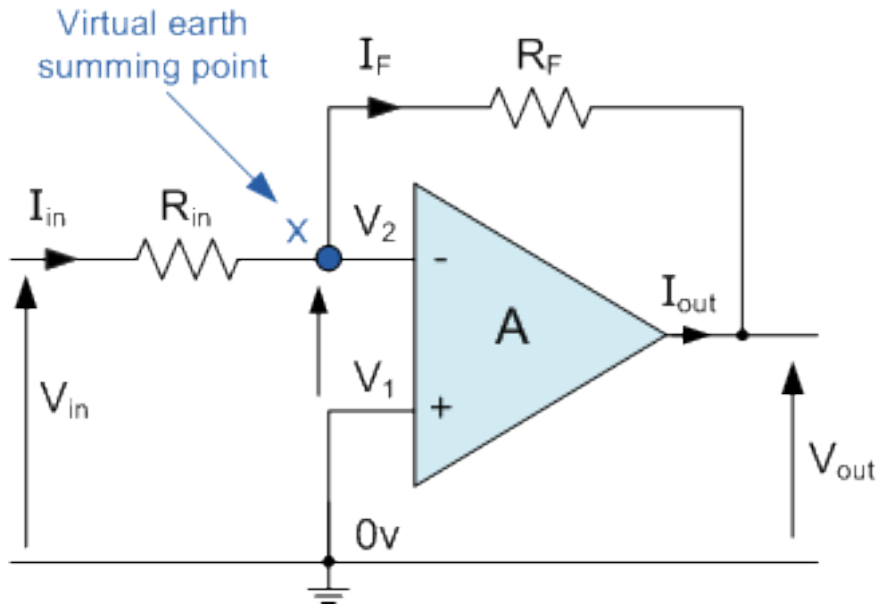
Realni pojačavač ima konačno pojačanje



- Razlikujemo 3 režima rada:
 - Linearni režim; nagib pojačanja je izuzetno velik
 - Plus zasićenje; $V_{iz} = +V_{cc}$
 - Minus zasićenje; $V_{iz} = -V_{cc}$
- Oblast linearnog rada je veoma uzana ($10 \mu V$)

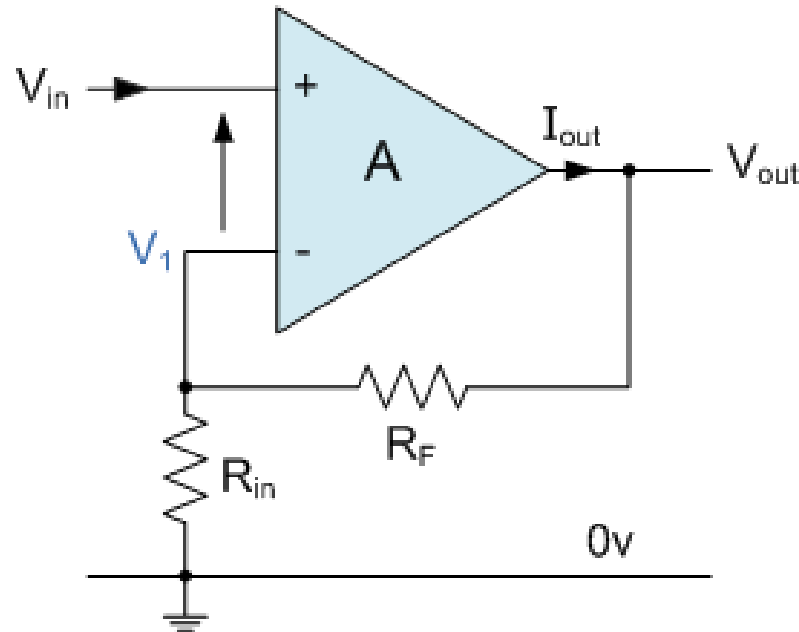


Invertujućí pojačavač



- Negativna povratna sprega, preko R_F , teži da dovede napon $V_d (=V_1 - V_2)$ na nulu
- NPS pravi virtuelnu masu
- Izračunati V_{out}/V_{in}

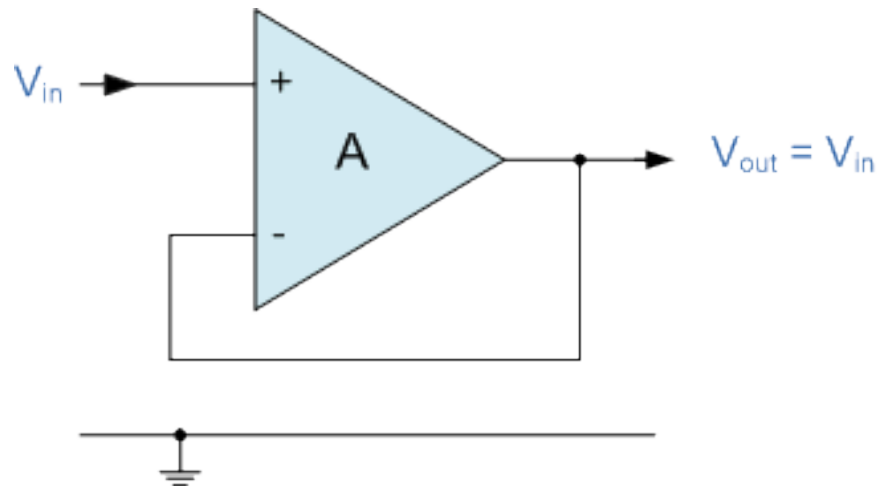
Neinvertující pojačavač



- Naći V_{out}/V_{in}
- Ulazna otpornost – uporediti sa invertujućim pojačavačem

Jedinični pojačavač

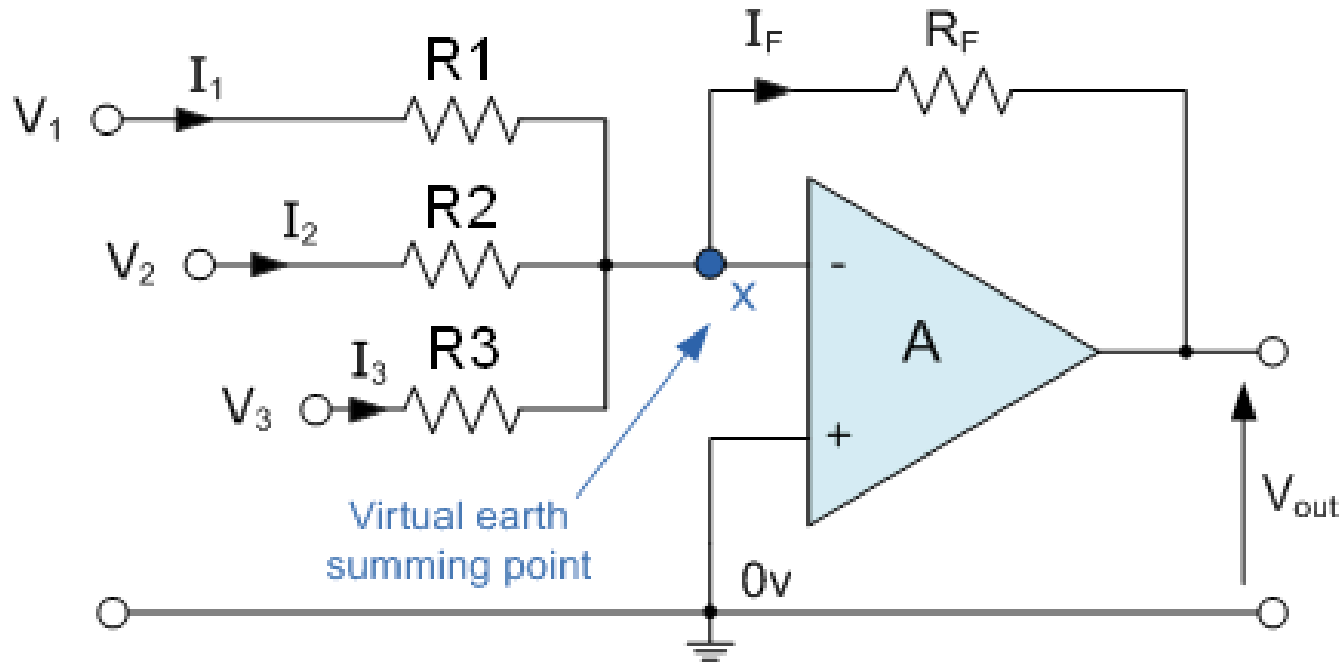
Voltage follower



- Koristi se za prenošenje napona sa visokoomskog izvora (naponsko sljedilo)
- FET i CMOS varijante OP imaju veoma malu ulaznu struju I_b (nA ili pA)



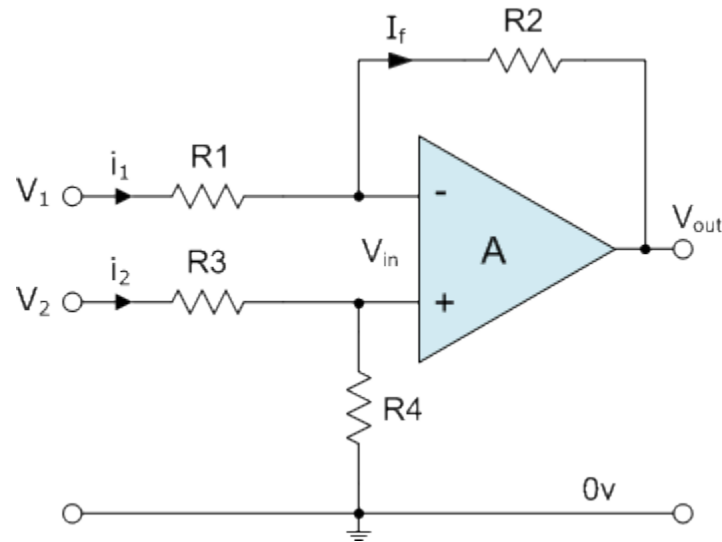
Sumirajući pojačavač



- Naći izraz za izlazni napon
- Odraditi simulaciju sa Qucs



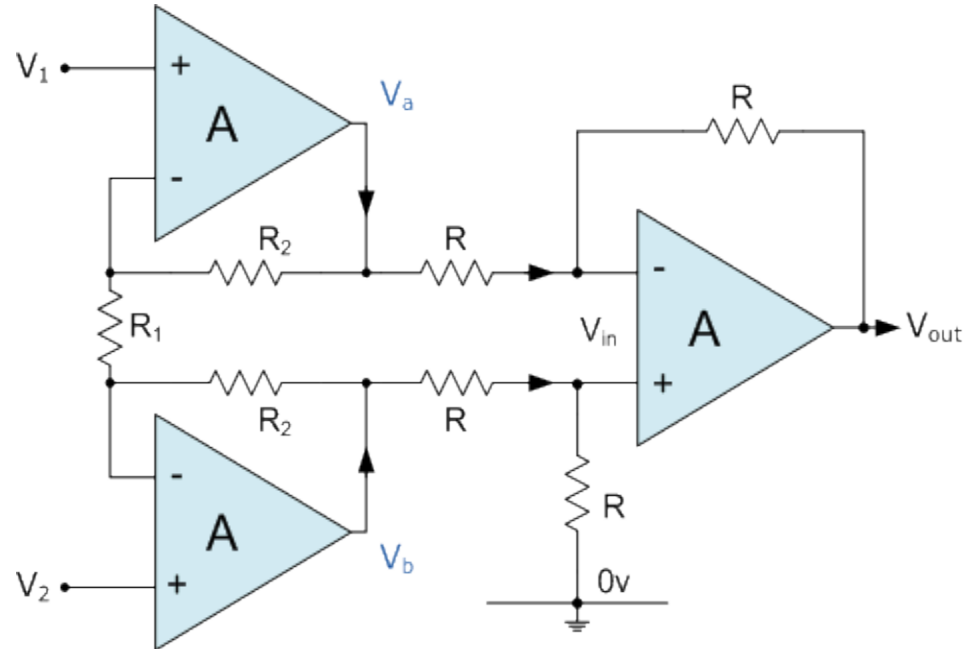
Diferencijalni pojačavač



- Naći opšti izraz za V_{out}
- Koliko je diferencijalno pojačanje A_{dif} , a koliko sinfazno pojačanje A_{com} ?
- Zatim postaviti uslov $A_{com}=0$
- Dobiće se $R1/R2=R3/R4$



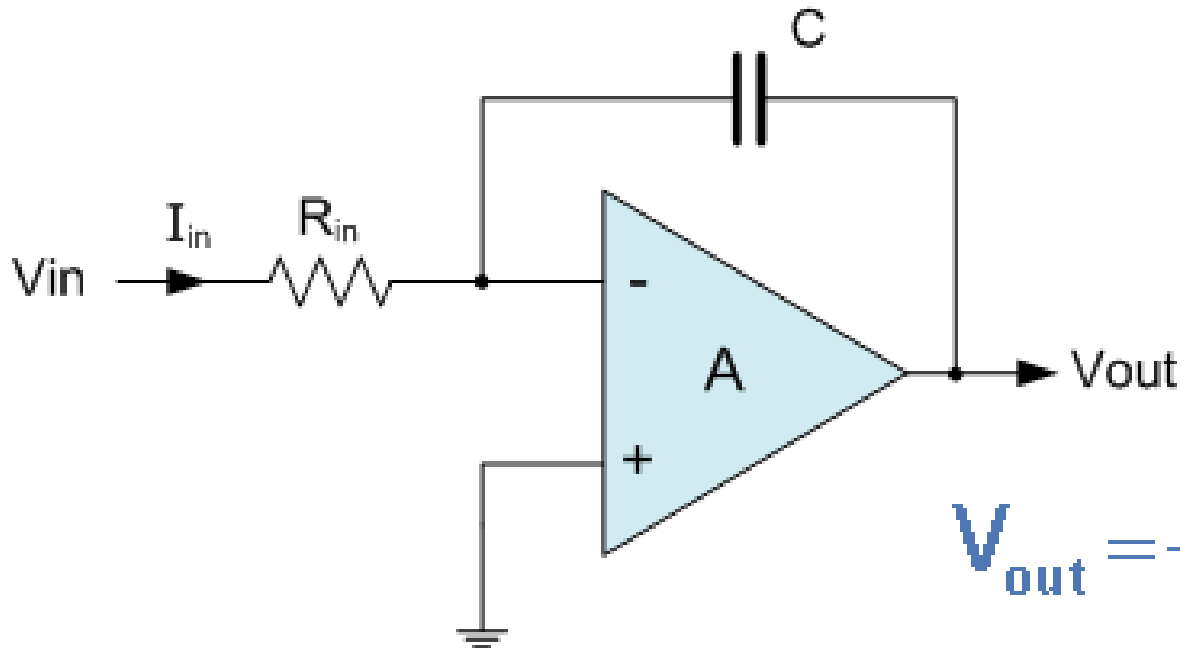
Instrumentacioni pojačavač



- Ulazni stepen sa 2 OP osigurava visoku ulaznu otpornost i
- Omogućava podešavanje pojačanja samo sa jednim otpornikom (R_1). Pokazati metodu polovljenja.
- Drugi (diferencijalni) stepen pravi izlazni signal prema masi



Integrator

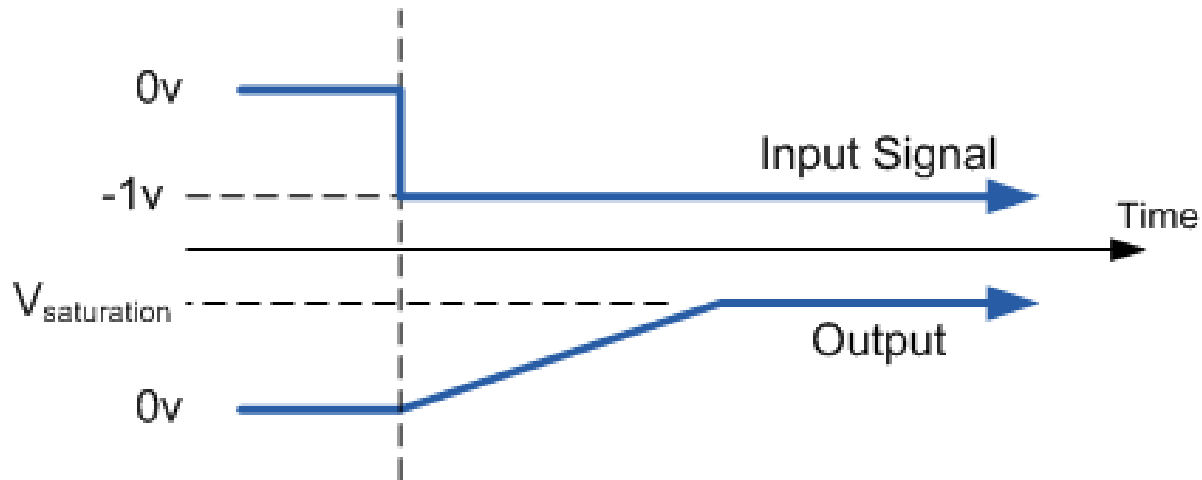


$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

- Ako je $V_{in} = -1V$ i kondenzator na početku prazan, kako će se mijenjati V_{out} ?
- Šta će se desiti ako je $V_{in}=0V$? ??



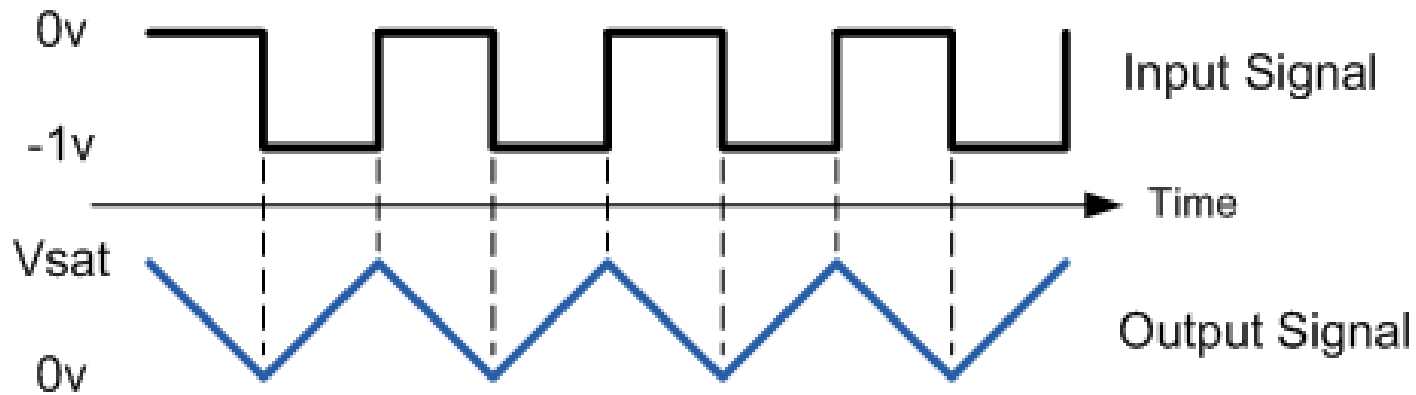
Odgovori



- Čak i kada bismo imali $V_{\text{in}}=0$, zbog nesavršenosti OP i njegovog V_{os} i I_{b} , i zbog šuma, integrator bi “nešto” integrirao i izlazni napon bi otišao u zasićenje.



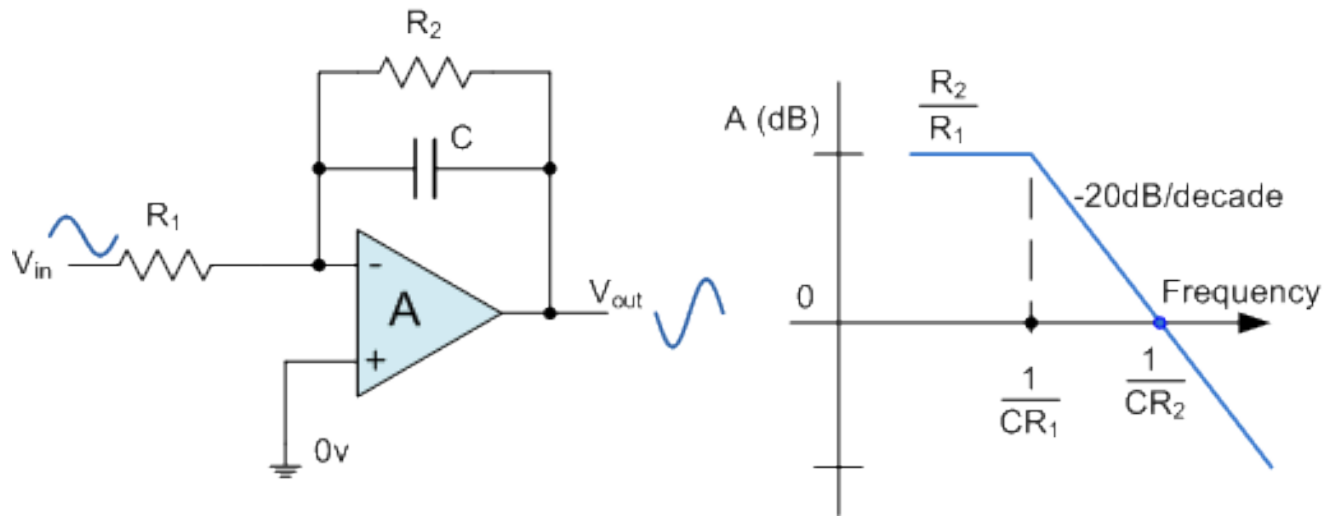
Generator funkcija



- Pomoću integratora možemo od četvrtki praviti trouglasti talasni oblik napona
- Od trouglastog možemo praviti parabolični oblik, itd

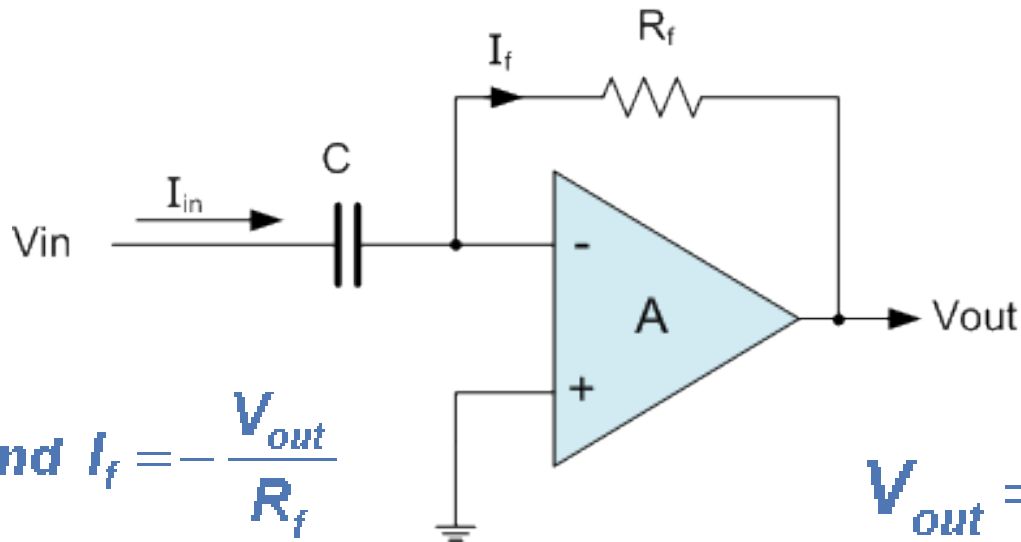


Integrator sa konačnim DC pojačanjem



- Dodavanjem R_2 , ograničavamo pojačanje na niskim učestanostima.
- Ovo je ujedno filter propusnik niskih učestanosti.

Diferencijator

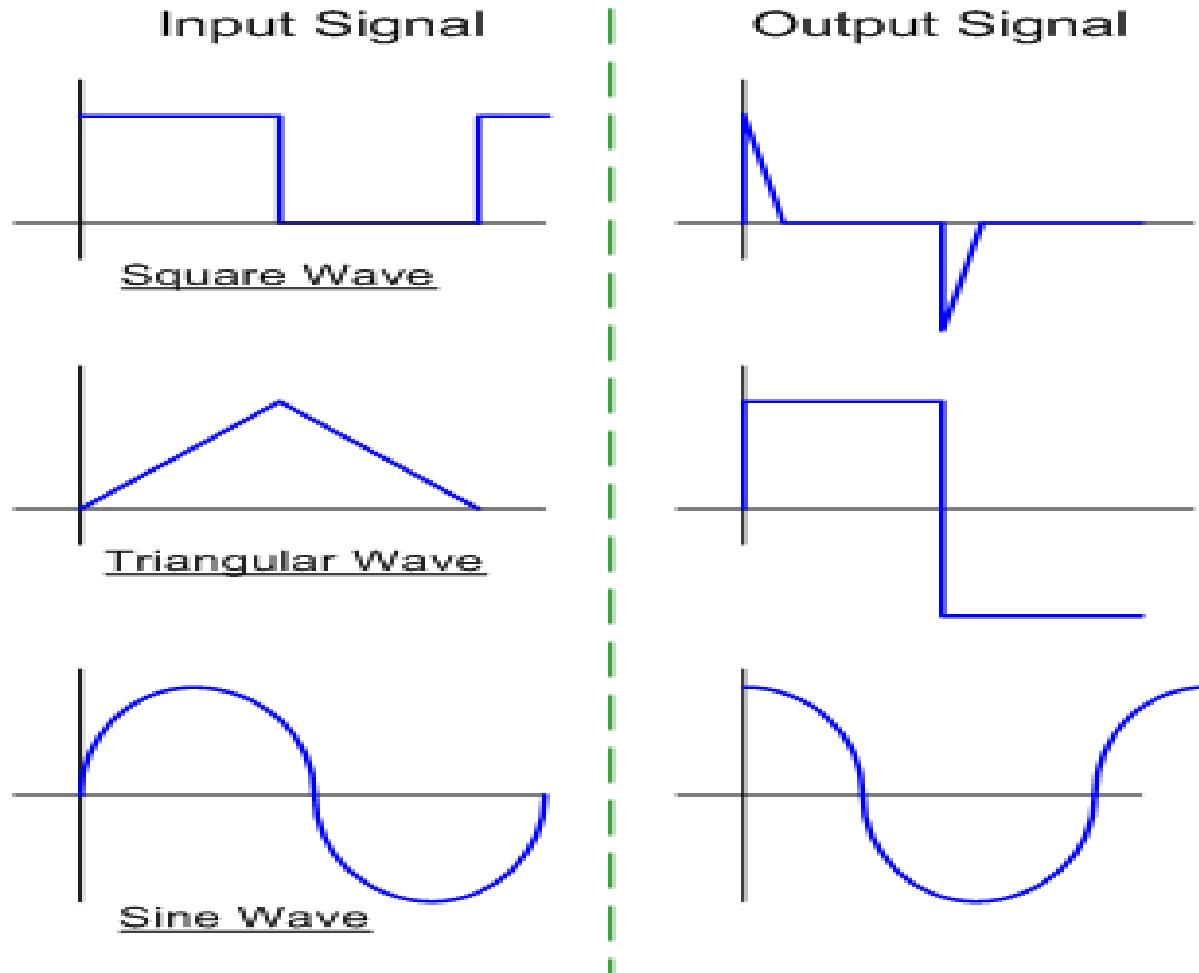


$$i_{in} = I_f \text{ and } I_f = -\frac{V_{out}}{R_f}$$

$$V_{out} = -R_f C \frac{dV_{in}}{dt}$$

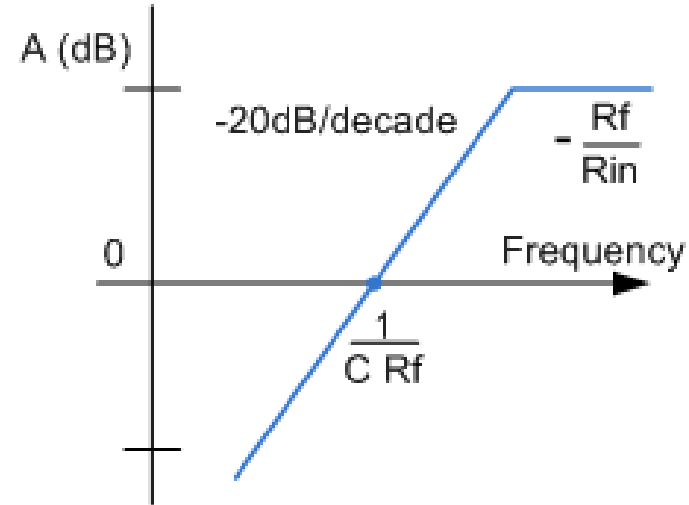
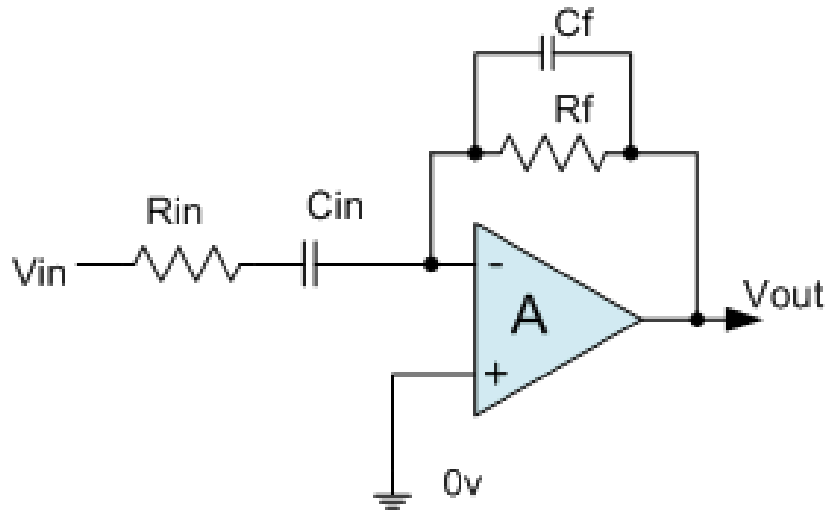
- Doći do izraza za Vout.
- Kakav će biti izlazni napon za ulaznu pobudu tipa: četvrtke, trougla ili sinusoide?

Odgovori



Da li su ovi dijagrami
tačni?

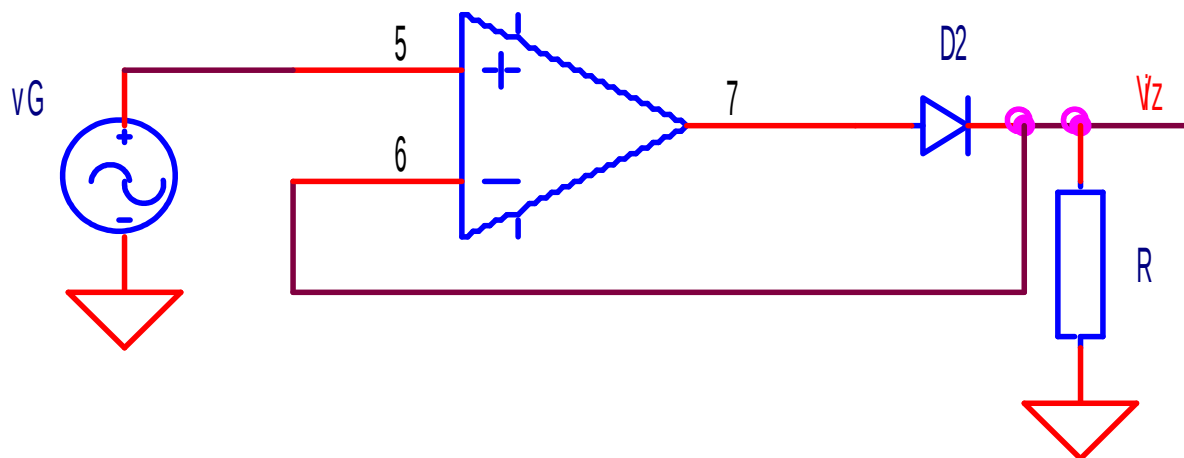
Poboljšani diferencijator



- Radi kao diferencijator na niskim učestanostima
- Na visokim učestanostima ima ograničeno pojačanje, tako da unosi manje šuma
- Ovo je ujedno filter propusnik visokih učestanosti



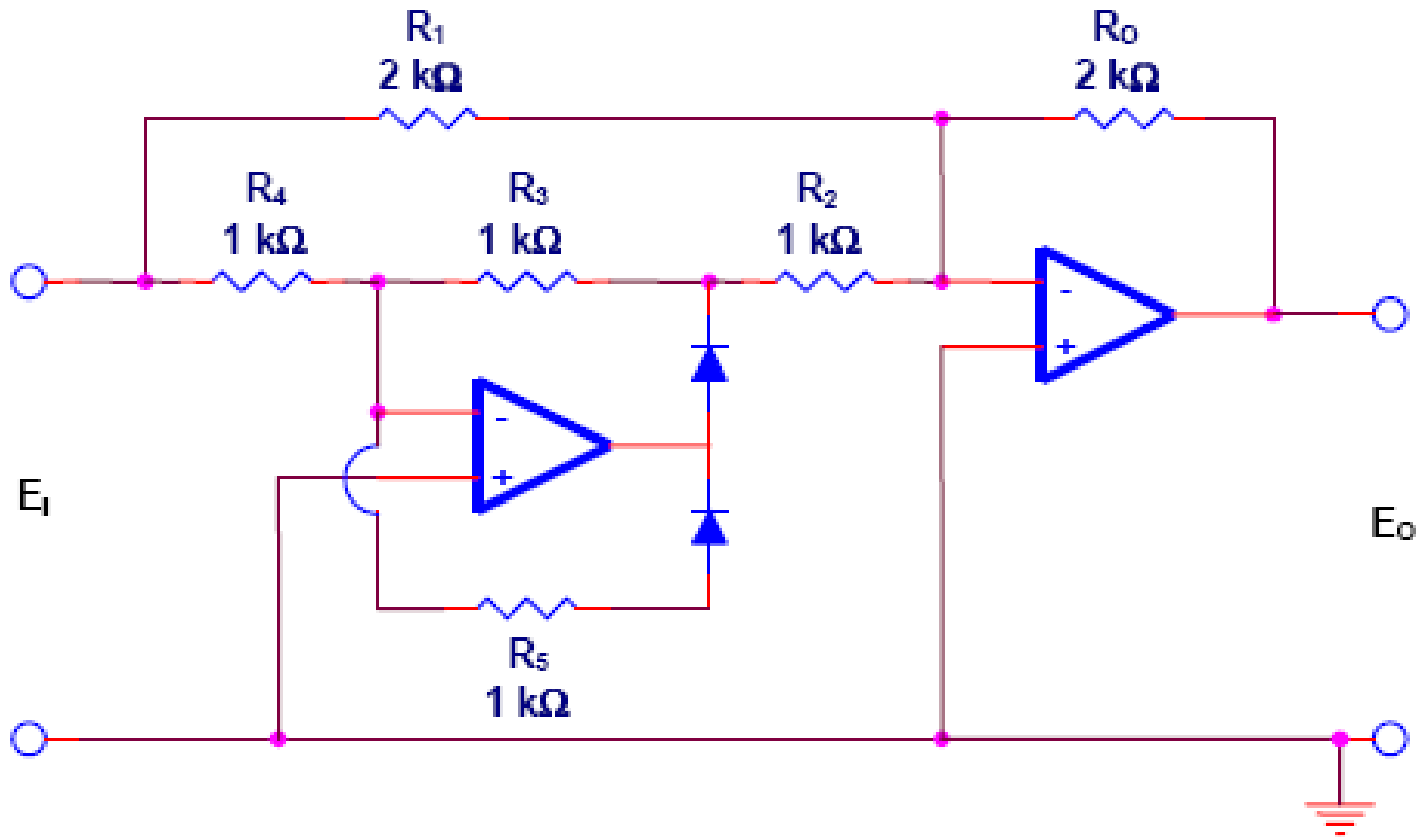
Idealna dioda (precizni ispravljač)



Obična dioda ima pad napona direktne polarizacije V_d oko 0,6V.

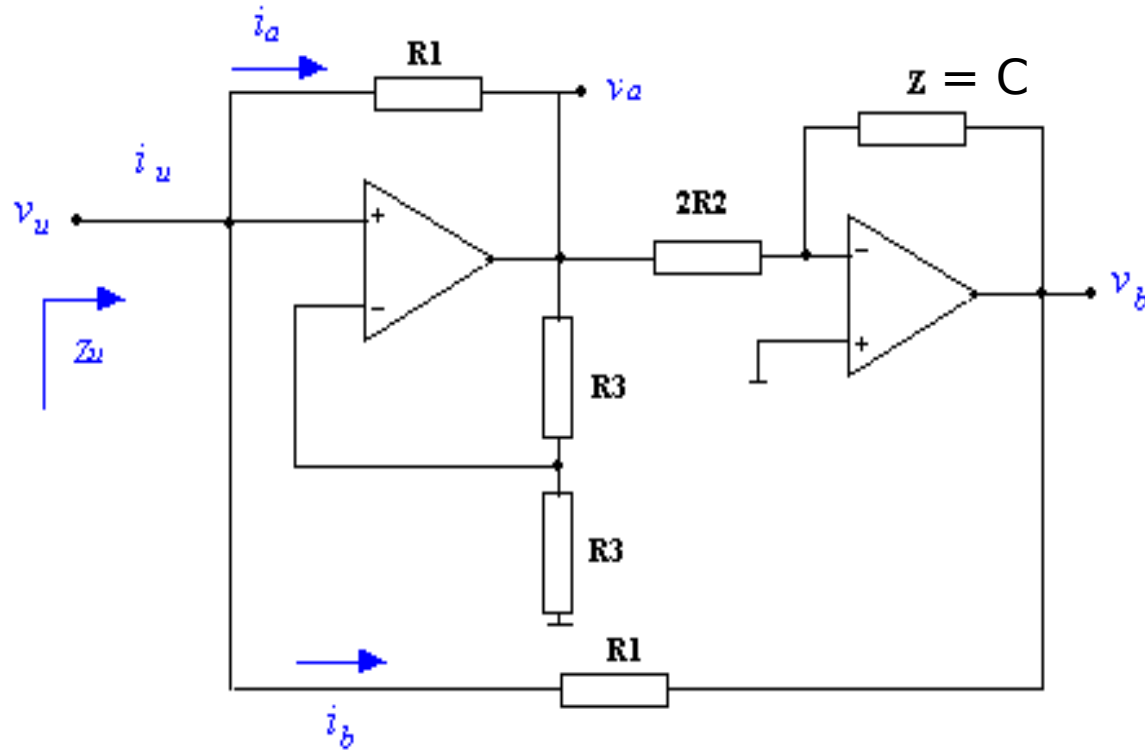
Ovo kolo se ponaša kao dioda sa $V_d=0V$.

Zadatak



Pokazati da kolo sa slike predstavlja punotalasni ispravljač (full wave rectifier).

Žirator

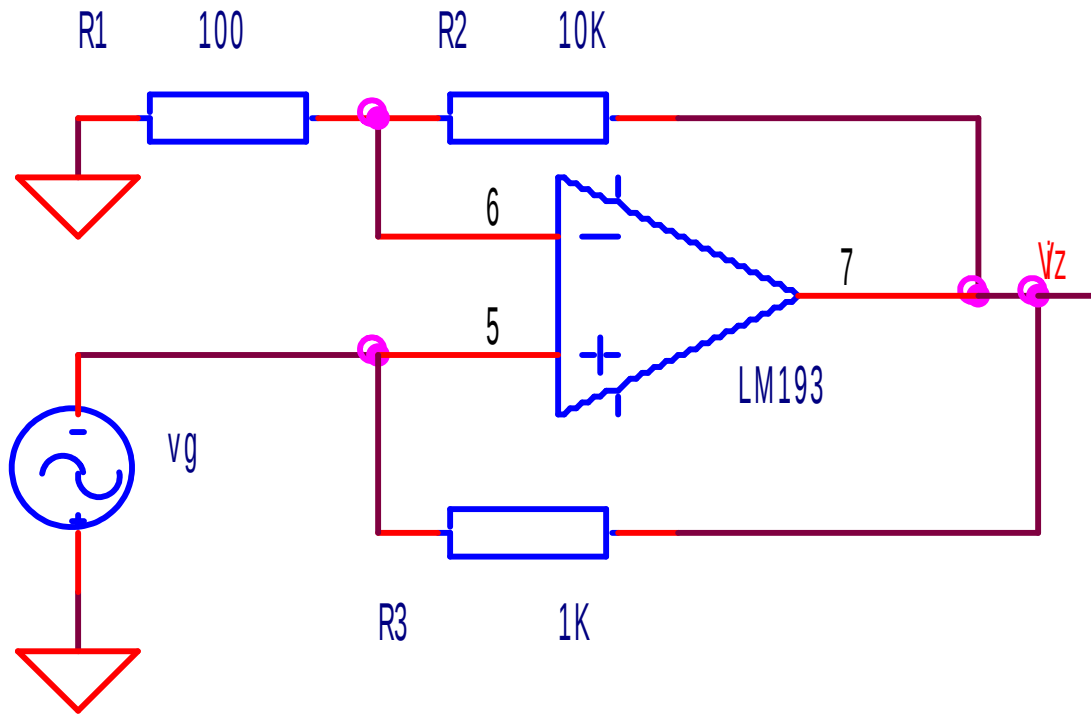


ŽIRATOR

Naći izraz za ulaznu impedansu ovog kola!



Negativna otpornost



Koliko iznosi ulazna otpornost za kolo sa slike?

Pogledati



- Amplifier
- Operational amplifier
- Operational amplifier applications
- Instrumentation amplifier
- Electronic amplifier
- [An Applications Guide for Op Amps AN-20.pdf](#)



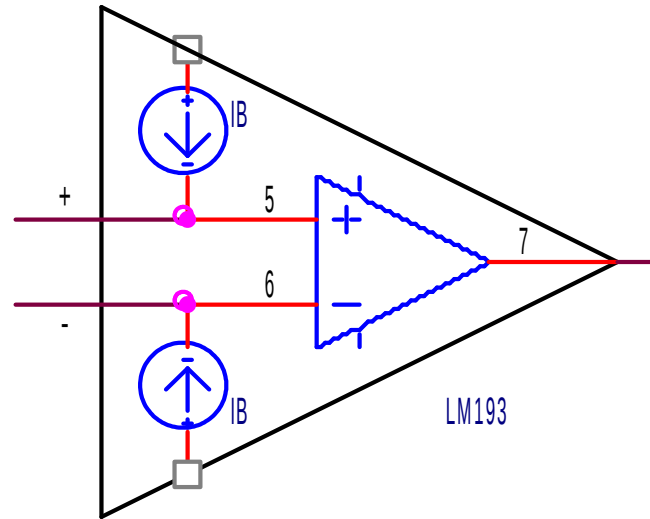
Nesavršenosti OP



- **Ulazne nesavršenosti su:**
struja polarizacije, strujni i naponski ofset, konačna ulazna otpornost.
- **Prenosne nesavršenosti su:**
konačno pojačanje, konačna presječna učestanost, konačni CMRR faktor.
- **Izlazne nesavršenosti su:**
opseg izlaznog napona je manji od napona napajanja, izlazna struja, konačni propusni opseg, nenulta izlazna otpornost.
- **Prelazne nesavršenosti su:**
slew rate, vrijeme rasta (za koje izlazni napon naraste sa 10% na 90% maksimalne vrijednosti).
- **Nesavršenosti po napajanju su:**
početna struja napajanja koju pojačavač sam za sebe troši bez ikakvog potrošača, konačan koeficijent potiskivanja smetnji iz napajanja.



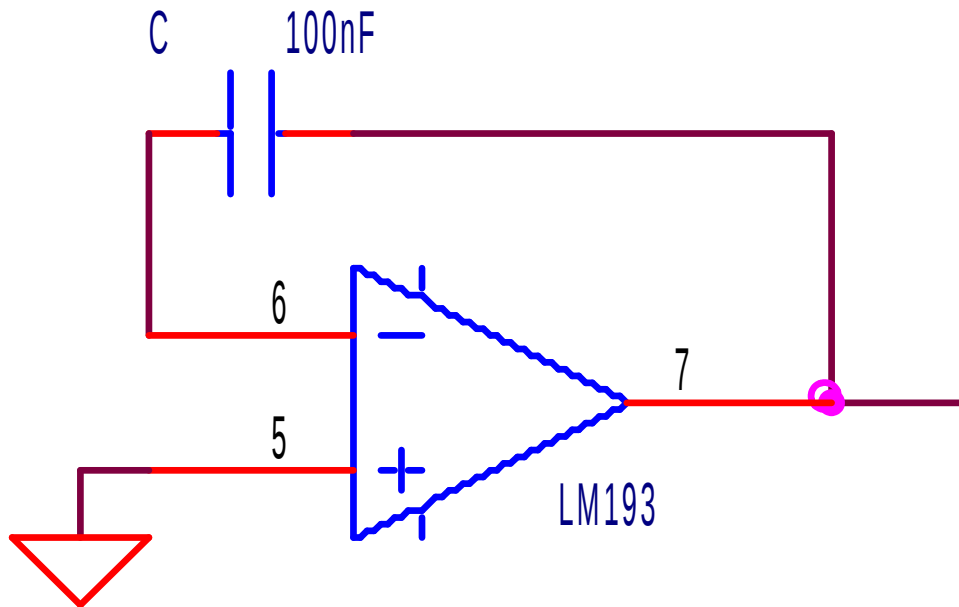
Ulazna struja polarizacije



- Operacioni pojačavač se uglavnom pravi sa bipolarnim tranzistorima, pa kroz ulazne priključke pojačavača teku struje (bazne) i one se zovu **ulazne struje polarizacije**. Vrijednosti ovih struja kod operacionog pojačavača u realizaciji sa bipolarnim tranzistorima su reda **10-100 nA**. U realizaciji sa FET-ovima ulazna struja je zapravo struja gejta, koja iznosi reda pA.



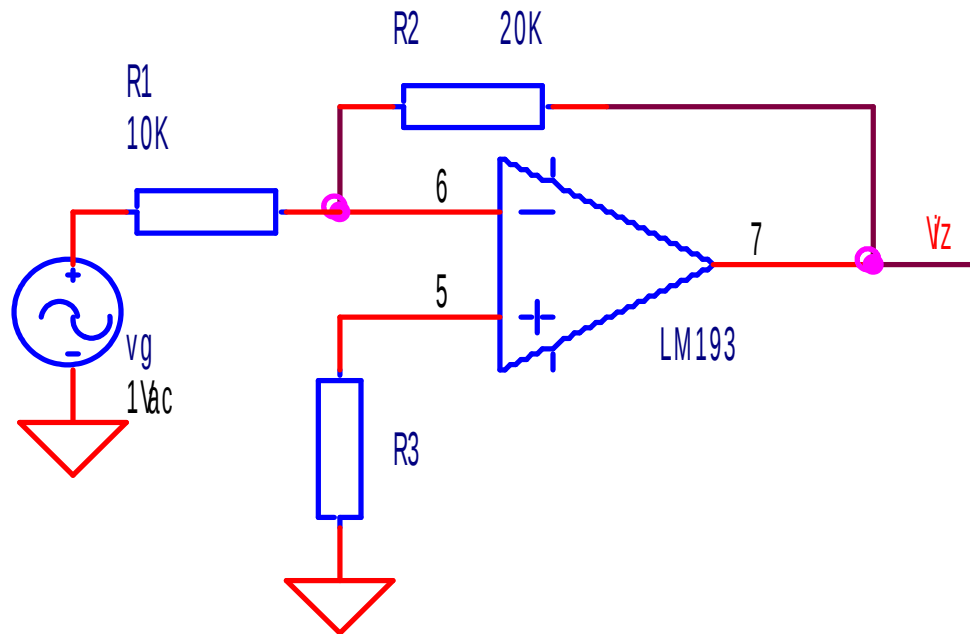
Zadatak



- Koliko iznosi ulazna struja ako se izlazni napon mijenja brzinom $0,1\text{V}/\text{sek}$?



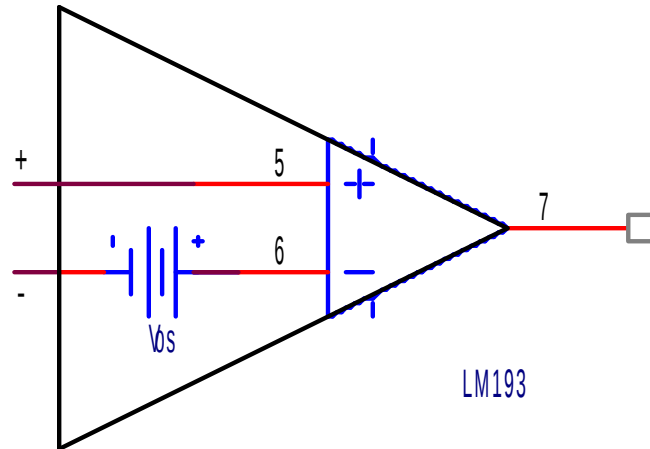
Zadatak



Koliko treba da iznosi otpornost R3, da bi se poništio uticaj ulaznih struja na izlazni napon pojačavača? $R3=?$ [K Ω]

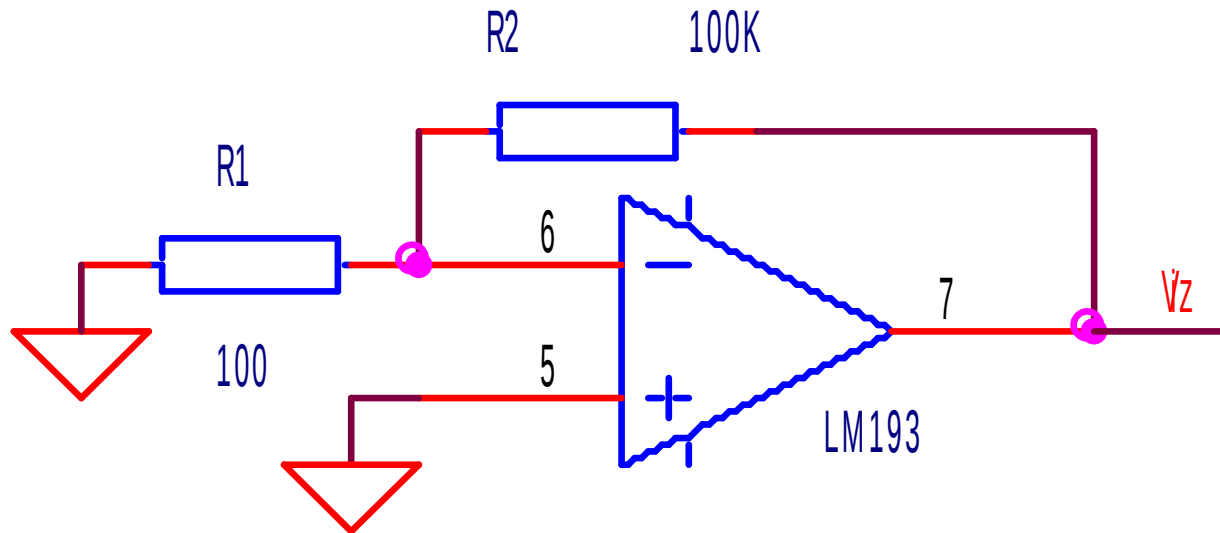


Ulazna naponska razdešenost



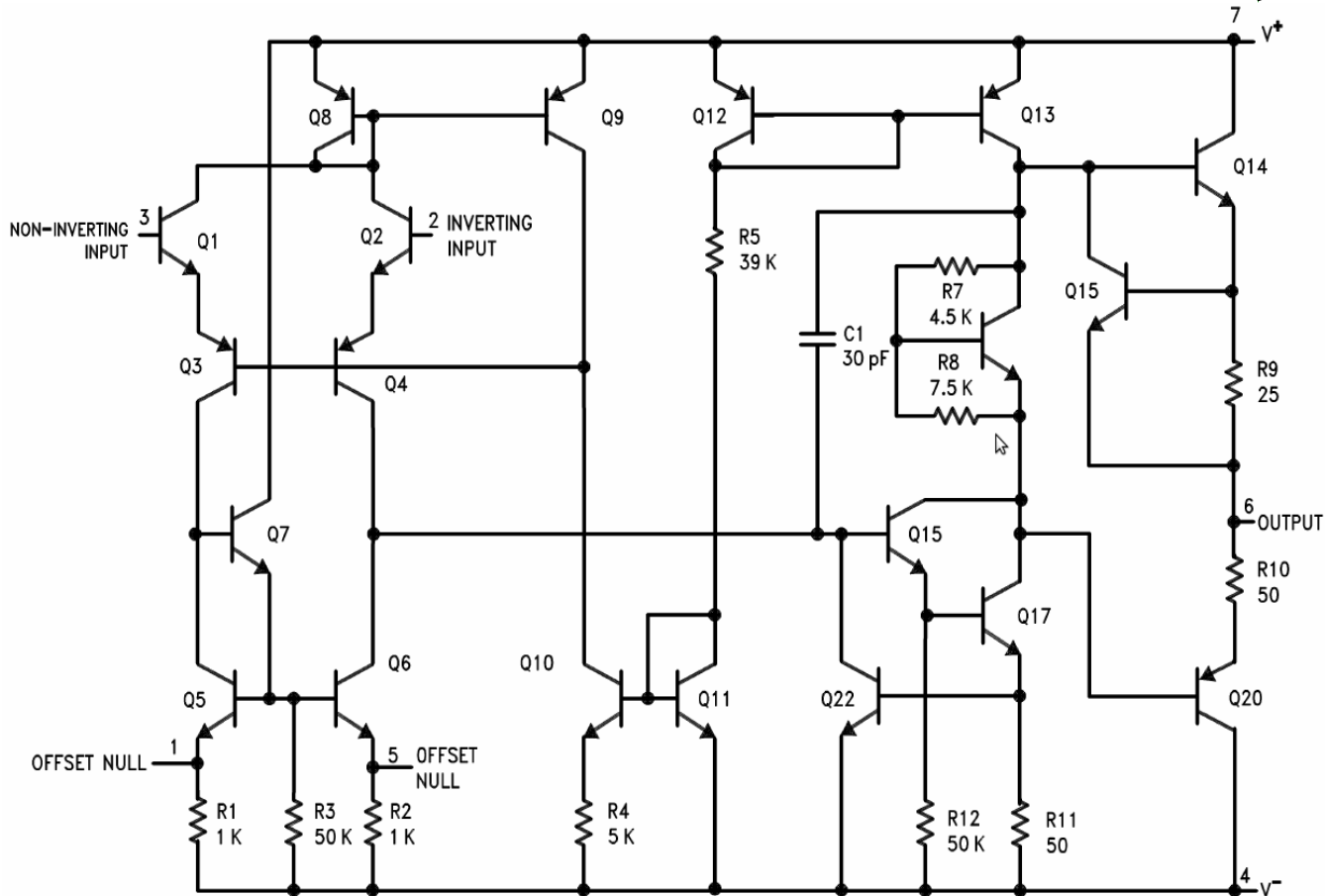
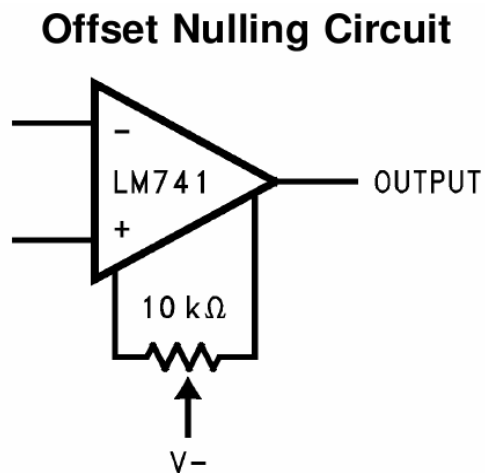
Diferencijalni napon, koji treba dovesti između ulaznih priključaka da bi napon na izlazu postao nula, naziva se napon razdešenosti, ofset napon (input offset voltage). Njegov polaritet nije moguće unaprijed odrediti jer zavisi od neuparenosti komponenata, čiji je karakter slučajan. Tipične vrijednosti ovog napona se kreću u granicama 2-10 mV.

Zadatak

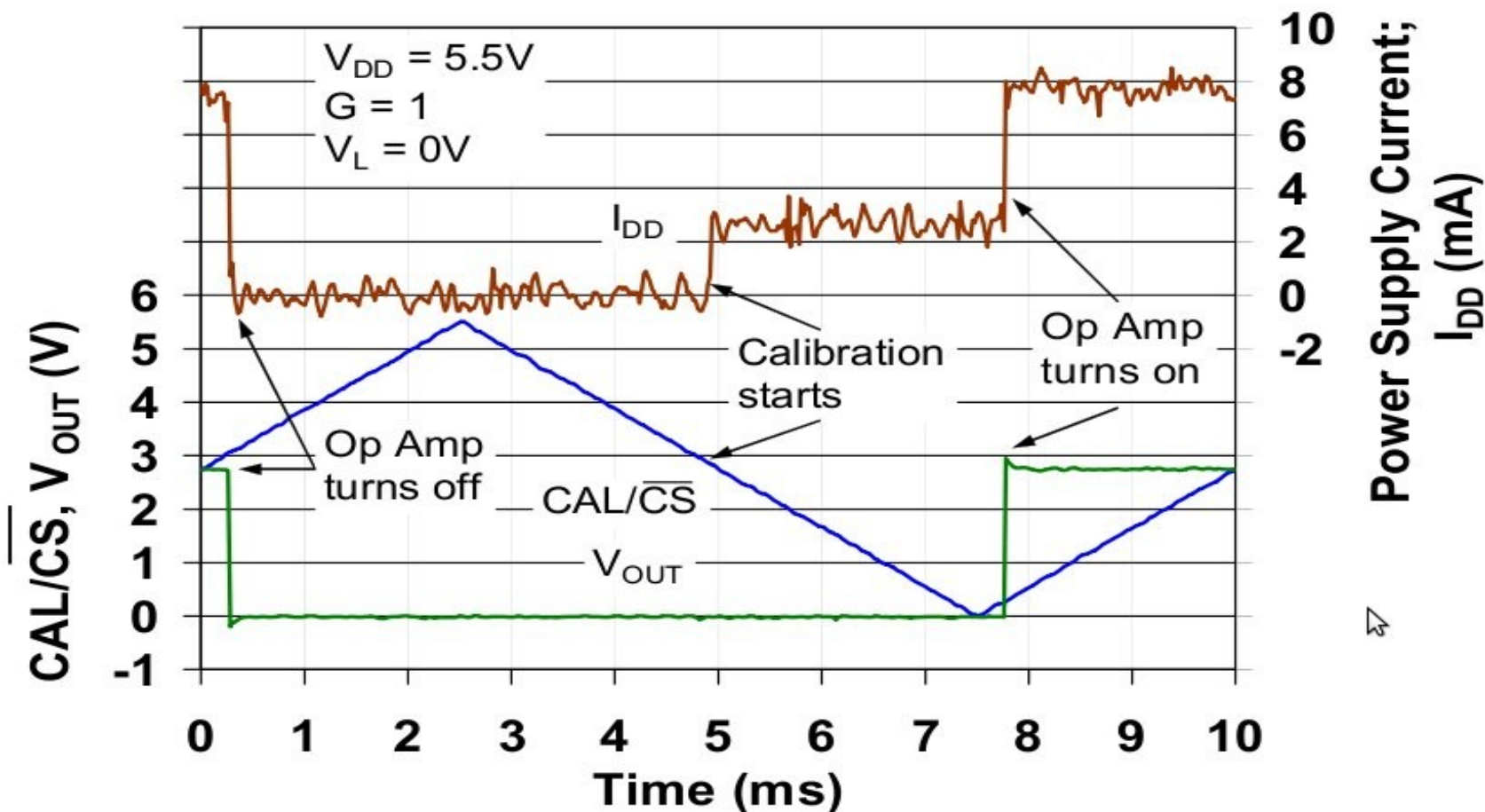


- Ako je izlazni napon $+2\text{V}$, kolika je ulazna naponska razdešenost $V_{os}=?$ [mV]

Poništavanje ulazne naponske razdešenosti potenciometrom

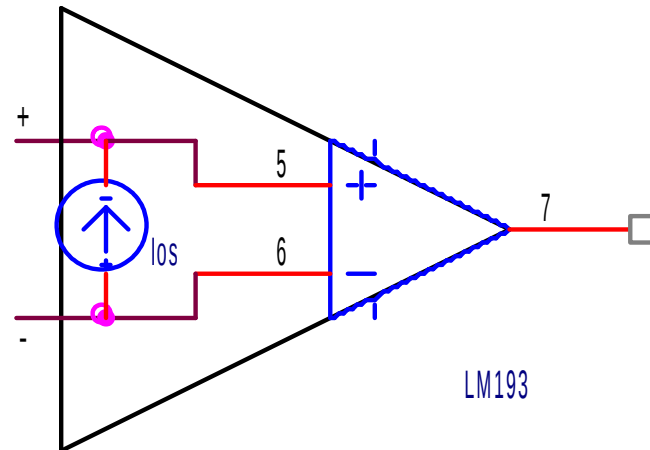


Poništavanje ulazne naponske razdešenosti pomoću mCAL



When CAL/CS pin goes high, the part is placed into a low power mode and the output is high-Z. When this pin goes low, a calibration sequence is started (which corrects VOS). At the end of the calibration sequence, the output becomes low impedance and the part

Razdešenost ulazne struje



Ni ulazne struje polarizacije nisu jednake. Ova razlika je slučajna funkcija, ne može se predvidjeti ni izračunati.

Srednju vrijednost ulaznih struja predstavljamo kao *struju polarizacije* (*bias*) :

$$I_B = (I_{B1} + I_{B2}) / 2$$

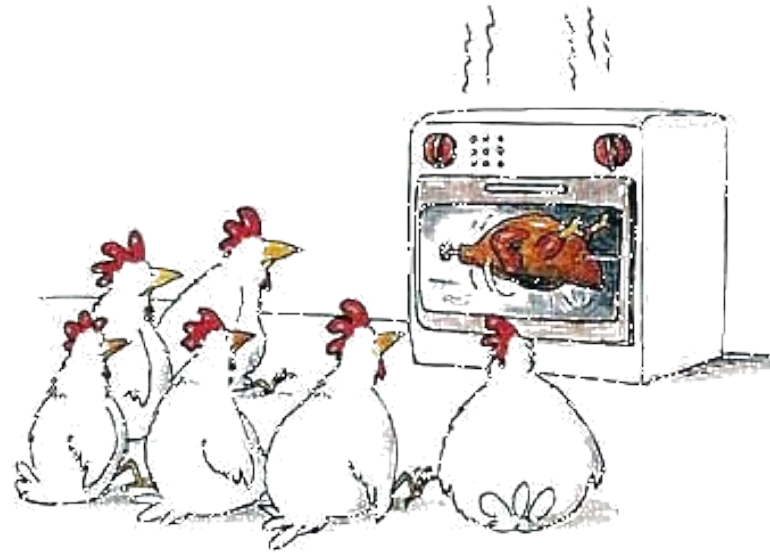
a njihovu razliku kao strujni ofset (razdešenost).

$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2}$$

Struji polarizacije (I_B) znamo smjer, jer zavisi od tipa tranzistora, dok je struja ofseta (I_{OS}) potpuno slučajnog karaktera.

Strujni offset definišemo kao *struju koju treba dovesti između ulaznih priključaka tako da se ulazne struje diferencijalnog pojačavača izjednače pri $V_A = V_B$ ($V_{OS} = 0$)*. Reda je 20 nA.

Temperaturno klizanje



- Sve nesavršenosti (ulazna struja, razdešenost napona i struje) mijenjaju se sa promjenom temperature. Ovo se zove temperaturno klizanje (drift) $\Delta I_b/T$, $\Delta V_{os}/T$, $\Delta I_{os}/T$.
- Temperaturno klizanje se izražava u jedinicama $\text{pA}/^\circ\text{C}$ ili $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Faktor potiskivanja srednje vrijednosti napona CMRR



- A_d - diferencijalno pojačanje
 A_s - pojačanje srednje vrijednosti ulaznog signala
 v_d - diferencijalni ulazni signal $v_d = v_A - v_B$
 v_s - srednja vrijednost ulaznog signala $v_s = (v_A + v_B) / 2$
- $v_i = A_d v_d + A_s v_s$ – izlazni napon zavisi od oba ulazna signala
- Kod idealnog pojačavača $A_s = 0$
- Kod realnog pojačavača
$$CMRR = A_d / A_s$$
- Jako dobri pojačavači imaju **CMRR** reda **100 dB**

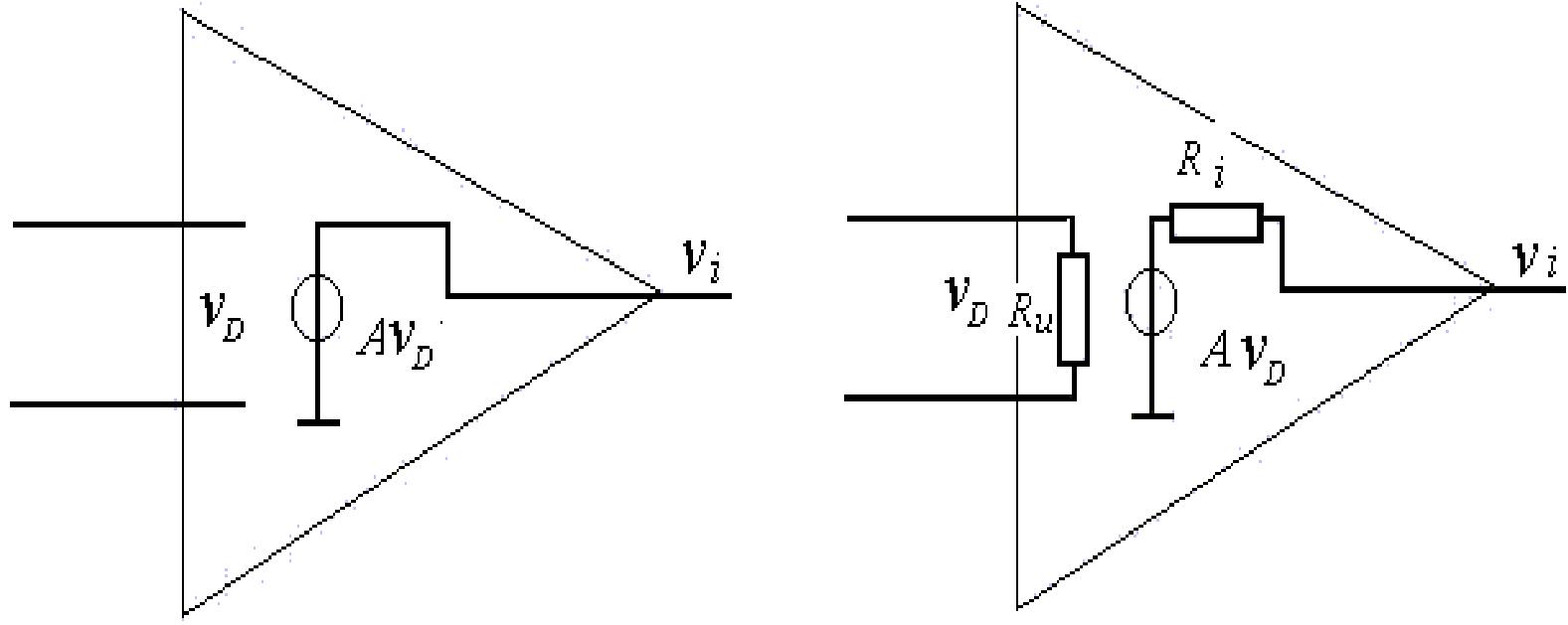


Ulazna otpornost



- Diferencijalna otpornost (između + i – ulaza)
- Otpornost prema masi
- Ove otpornosti zavisi od tehnologije izrade.
- Kod bipolarnih OP iznosi oko **100kΩ** do **10MΩ**.
- Kod (C)MOS(FET) OP iznosi reda **GΩ**.

Izlazna otpornost



- Vrijednosti izlazne otpornosti se kreću oko **50-500 Ω** .

Brzina promjene (slew rate)

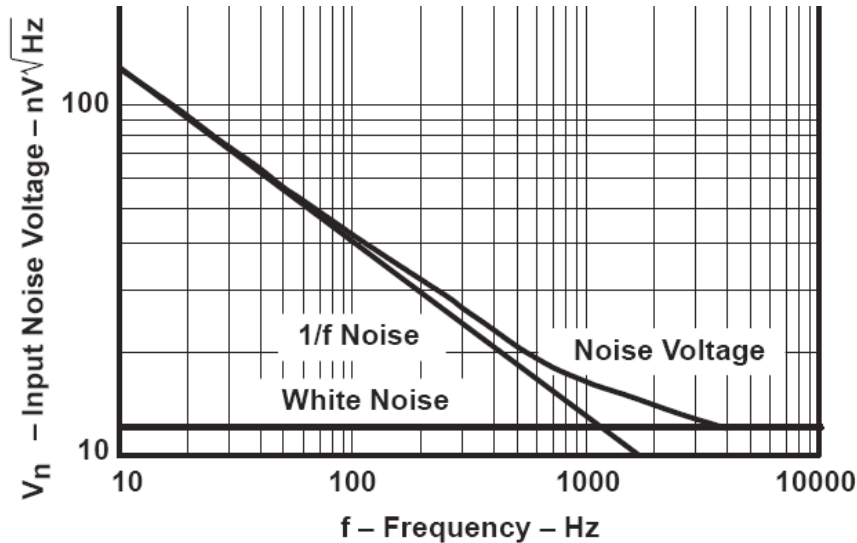


- Slew rate je maksimalna brzina promjene izlaznog napona:

$$SR = |dv_i/dt|_{max}$$
- Ako je pojačavač bio u zasićenju, imamo i čisto kašnjenje.
- Zadatak: Ako OP ima $SR = 0,3V/\mu s$, i treba da radi kao jedinični pojačavač i ulazni signal ima amplitudu 5V, do koje učestanosti će raditi ispravno.



Vrste šuma kod OP



$$\overline{i_n^2} = \overline{(i - i_D)^2} = \int 2qi_D df$$

$$\overline{e^2} = \int 4kTRdf \text{ or } \overline{i^2} = \int (4kT / R) df$$

$$\overline{e^2} = \int (K_e^2 / f) df \text{ or } \overline{i^2} = \int (K_i^2 / f) df$$

1. šum efekta sačme (Shot noise) potiče od prolaska naelektrisanja preko potencijalne barijere (npr pn spoj)
2. termički šum (Thermal noise)
3. 1/f šum (Flicker noise) povezan je sa jednosmjernom strujom
4. šum izbivanja (Burst noise) potiče od nesavršenosti poluprovodničkog materijala i teških ugrađenih jona
5. Lavinski šum (Avalanche noise) javlja se kada pn spoj radi u inverznoj polarizaciji.

Modeliranje šuma kod OP

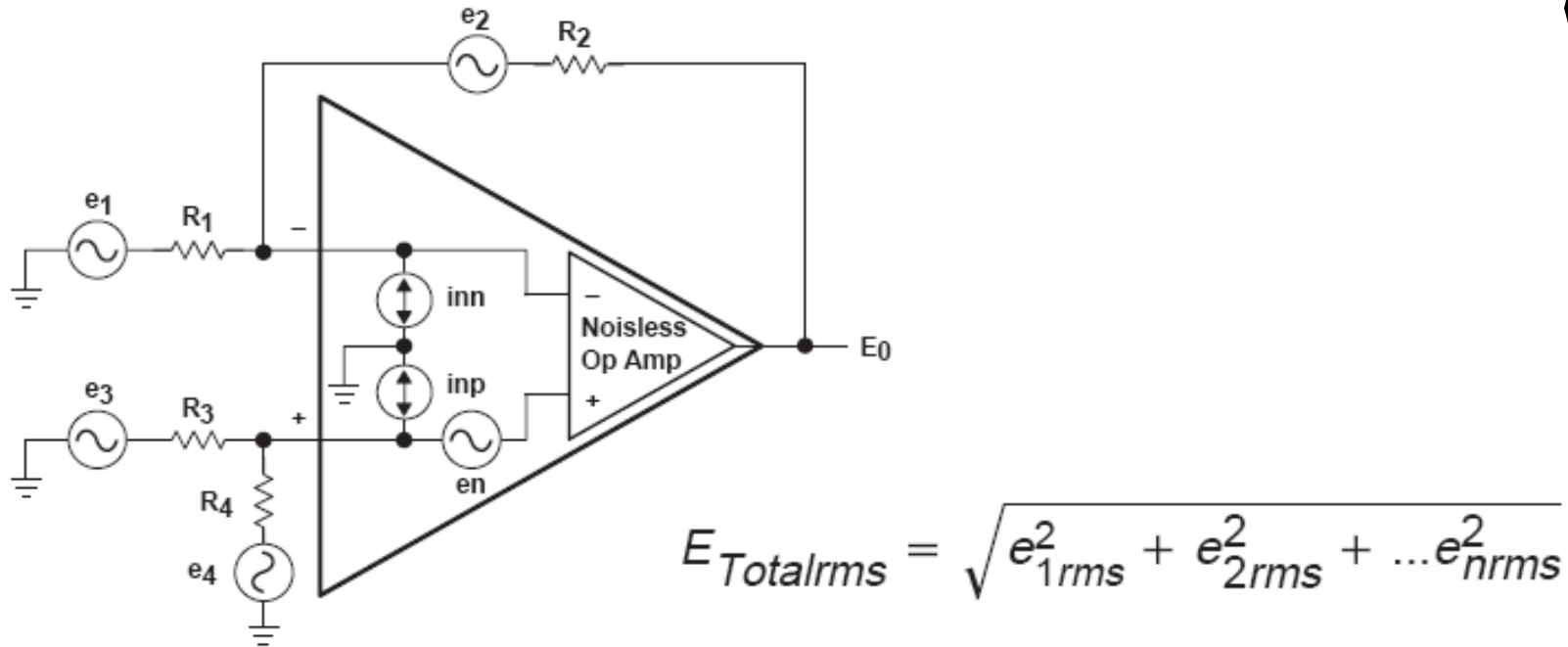
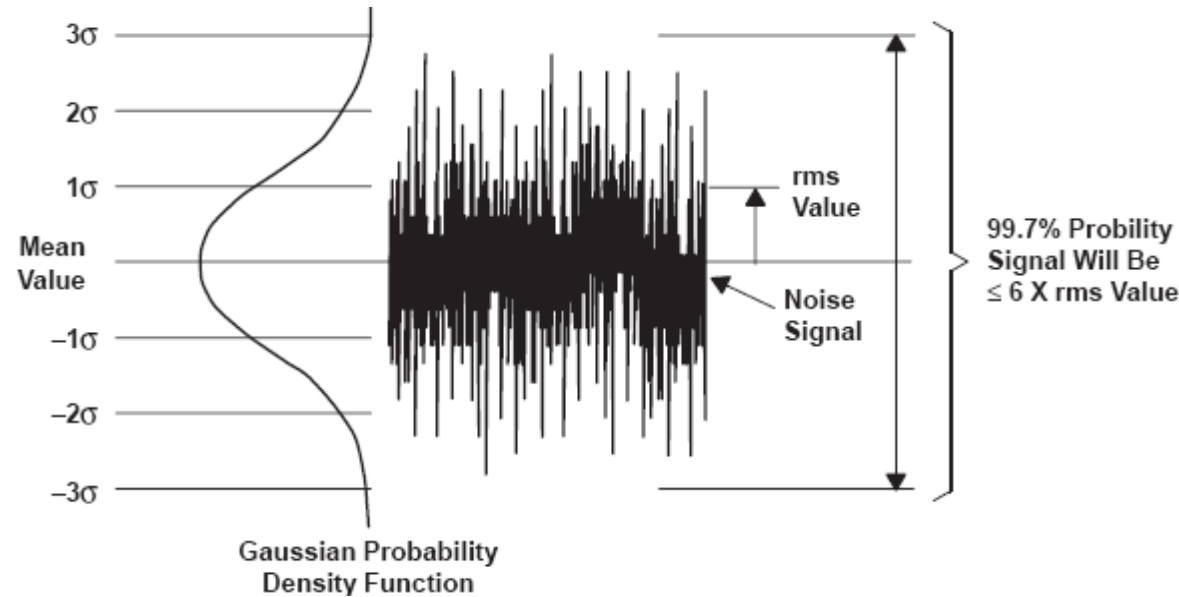


Figure 17. Differential Op Amp Circuit Noise Model

- Modeliranje šuma kod diferencijalnog pojačavača. Otpornici proizvode šum e_1 , e_2 , e_3 i e_4 . Ostali izvori šuma potiču od OP.

Još o šumu

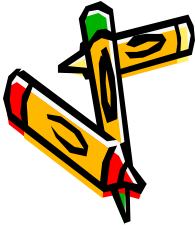
Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits



$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[\left((inn) R_2 \right)^2 + \left((inp) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(en \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(4kTR_1 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right) + (4kTR_2) + \left(4kTR_3 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right) + \left(4kTR_4 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right) \right] df}$$

$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[\left((inn) R_2 \right)^2 + \left((inp) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(en \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + 4kT \left[\frac{R_2^2}{R_1} + R_2 + \left(R_3 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right) + \left(R_4 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right) \right] \right] df}$$

CFB operacioni pojačavač



- Current versus Voltage feedback Opamps.
pdf

