

Operacionalni pojačavači (OP)

- **Opšta razmatranja**
- **Komparator**
- **Linearna prenosna funkcija**
- **Nelinearna prenosna funkcija**
- **Nesavršenosti operacionog pojačavača**

Pregled

Osnovni koncepti

- Osobine OP-a

Linearna kola sa OP

- Neinvertujući pojačavač
- Invertujući pojačavač
- Integrator i diferencijator
- Sabirač

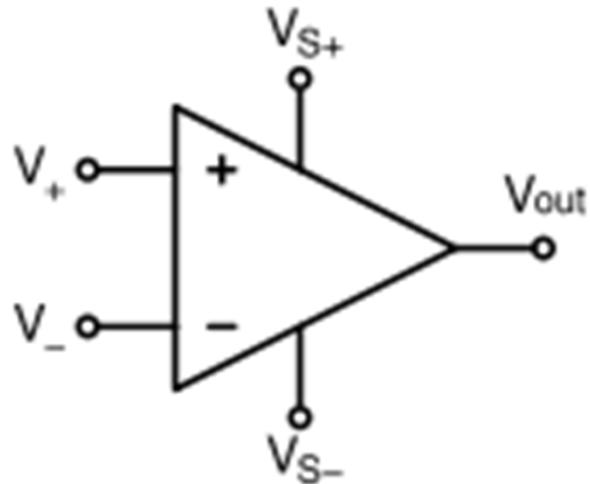
Nelinearna kola sa OP

- Precizni ispravljač
- Logaritamski pojačavač
- Kolo za korjenovanje

Nesavršenosti OP-a

- DC ofset
- Ulazne polarizacione struje
- Ograničenja brzine
- Konačne ulazne i izlazne impedanse

Što je operacioni pojačavač?

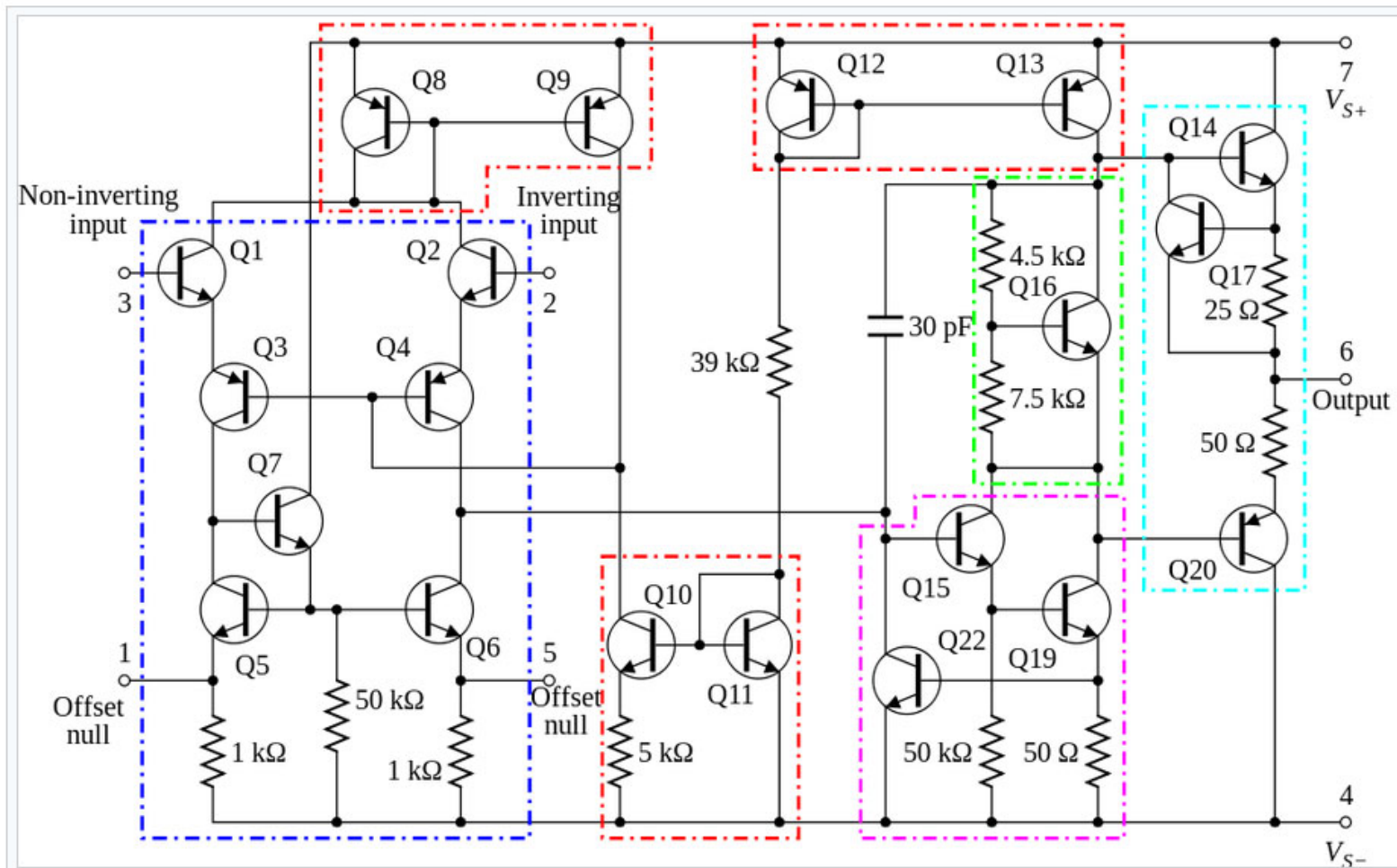


- Pojačavač visokog pojačanja
- Ima diferencijalne ulaze
- Obično ima jedan izlaz
- Visoka ulazna i mala izlazna otpornost
- Negativnom povratnom spregom se oblikuje prenosna karakteristika

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,...

Realizuje se u integriranoj tehnici



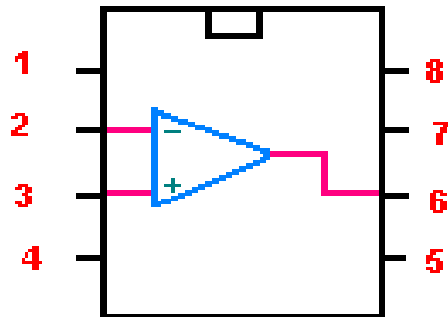
A component-level diagram of the common 741 op amp. Dotted lines outline: ■ current mirrors; ■ differential amplifier; ■ gain stage; ■ voltage level shifter; ■ output stage.

Izgleda kao na slikama



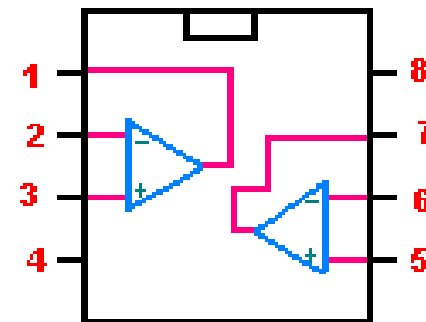
Funkcije pinova

741



Single Opamp

1458

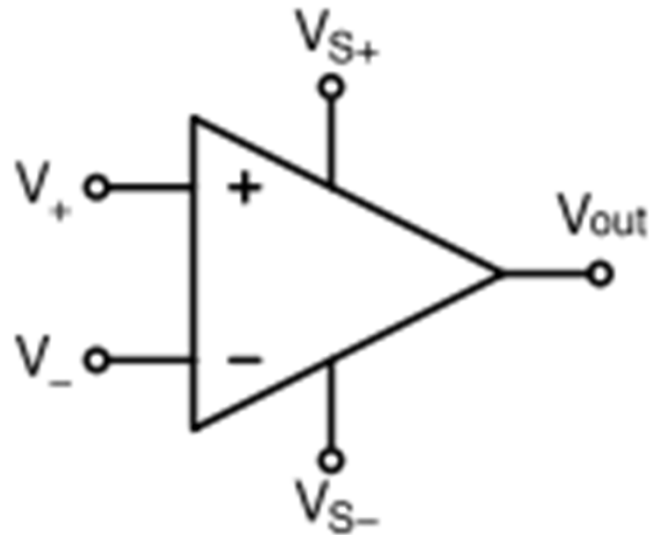


Dual Opamp

Pin Out

Function	741	1458	Specifications
+ V	7	8	Supply Voltage +/- 18v Power Disp. 400 mw Diff. Input Volt. +/- 30v Input Voltage +/- 15v Operating Temp. 0 to 70 C
- V	4	4	
+ IN	3	3,5	
- IN	2	2,6	
OUT	6	1,7	
Offset	1,5	N/A	

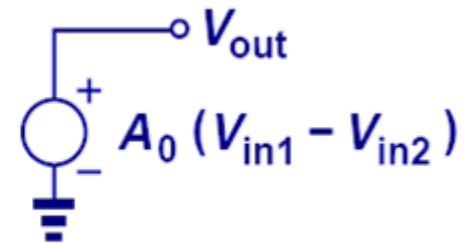
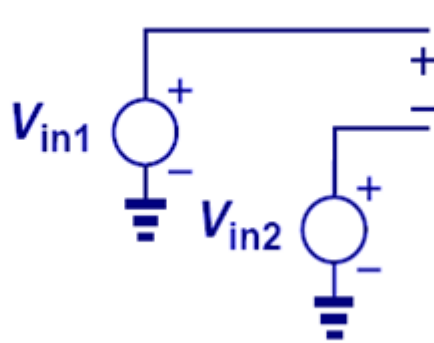
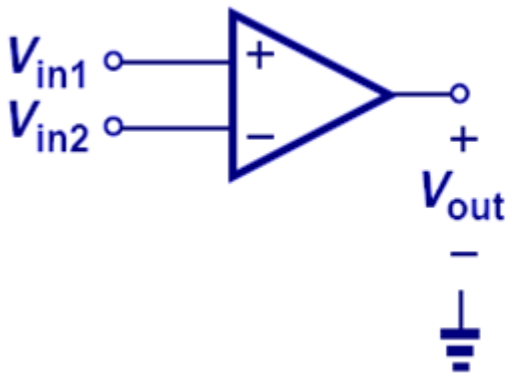
Simbol operacionog pojačavača



Ulaz "+" se naziva *neinvertujući*, a ulaz "-" *invertujući* ulaz pojačavača.

Izlazni napon je u fazi sa naponom na neinvertujućem ulazu, a fazno pomjeren za π u odnosu na napon na invertujućem ulazu.

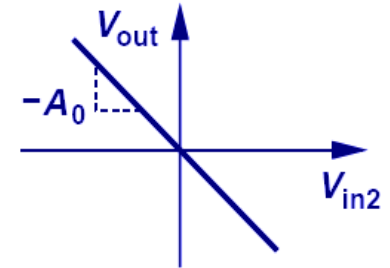
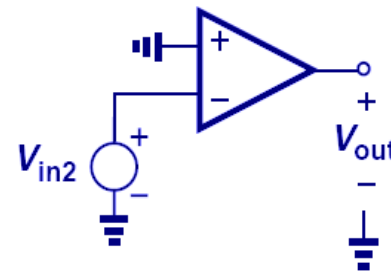
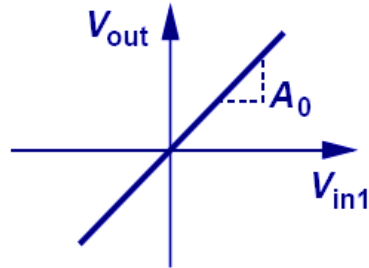
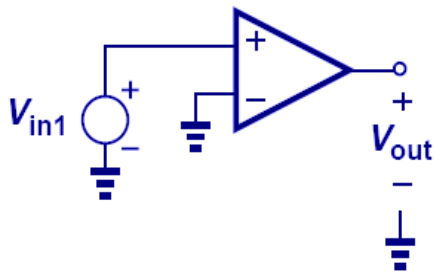
Prenosna funkcija



$$V_{out} = A_0 (V_{in1} - V_{in2})$$

➤ Pojačava razliku između dva ulaza.

Invertujući i neinvertujući OP

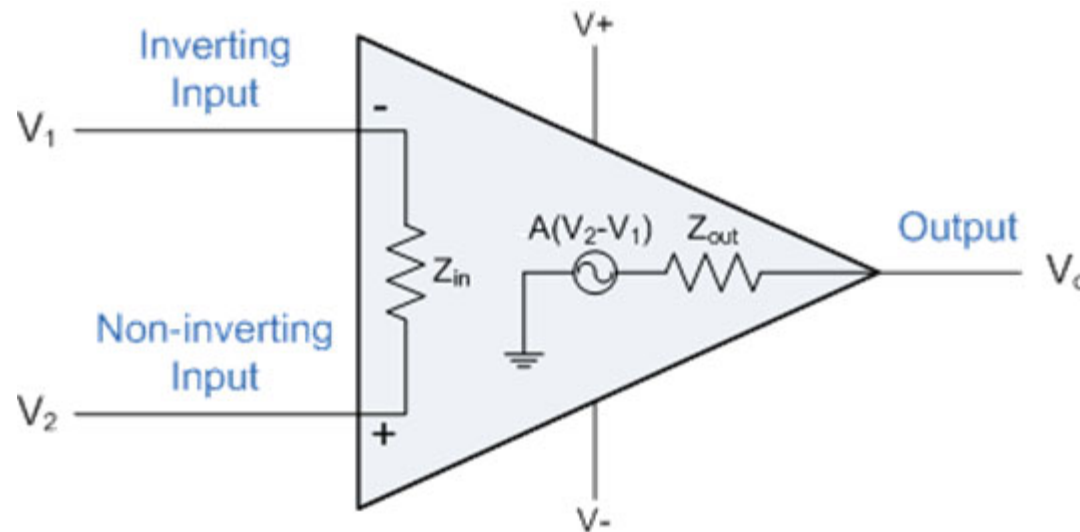


- Ako je negativni ulaz spojen na masu, pojačanje je pozitivno.
- Ako je pozitivni ulaz spojen na masu, pojačanje je negativno.

Idealni operacioni pojačavač

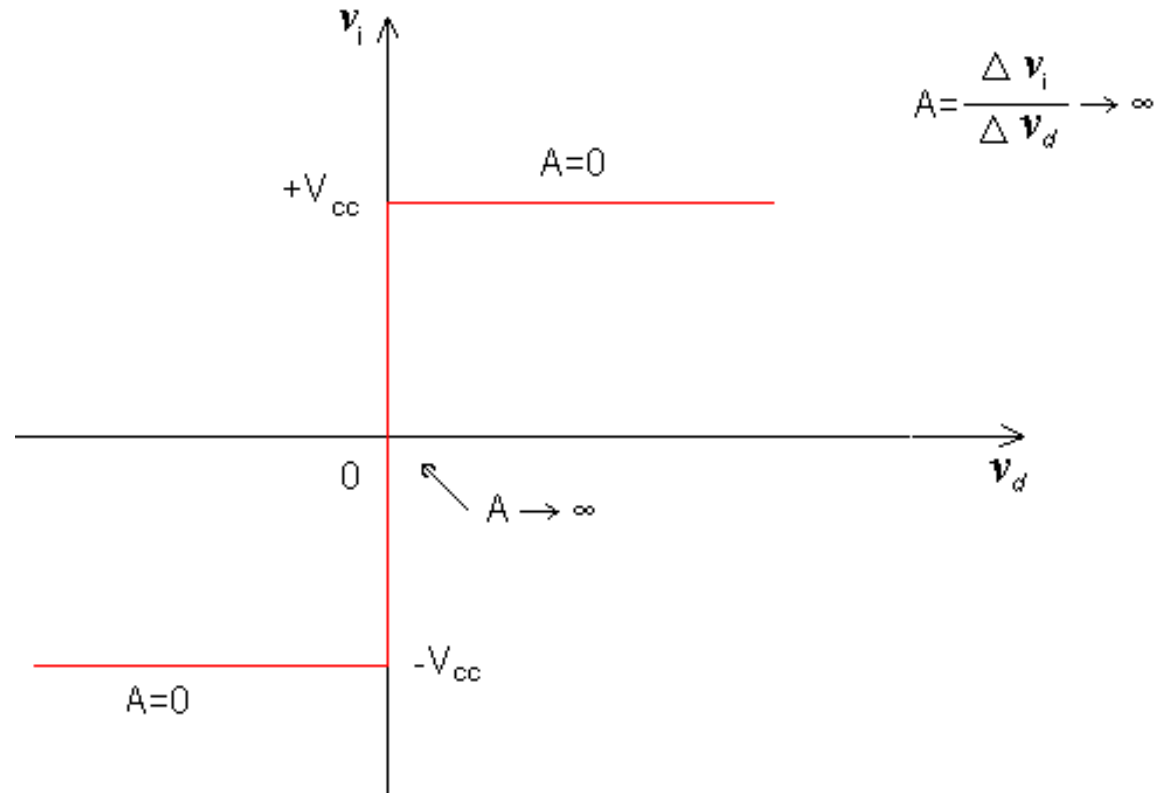
- **Beskonačno pojačanje**
- **Beskonačna ulazna impedansa**
- **Nulta izlazna impedansa**
- **Beskonačna brzina**

Idealni operacioni pojačavač



- 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, CMRR, ...)
- Jedina nesavršenost, koja se najčešće uzima u obzir:
 - Izlazni napon je ograničen opsegom napajanja

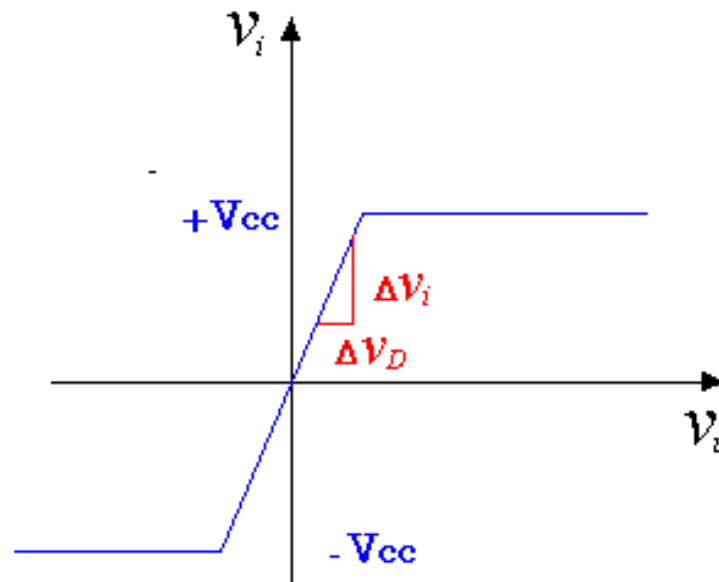
Ulazno izlazna karakteristika



- 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 $V_d=0$

Osvrt na realni operacioni pojačavač

Konačno pojačanje

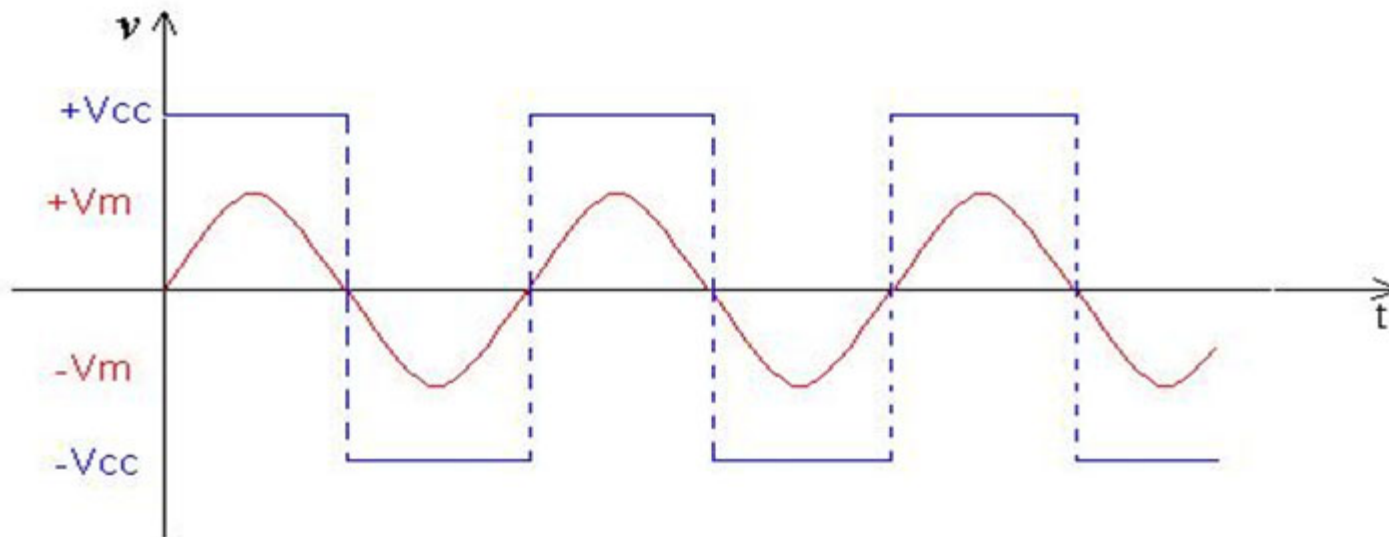
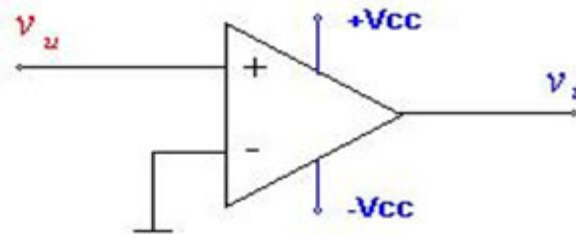


- **Razlikujemo 3 režima rada:**
 - Linearni režim; nagib pojačanja je izuzetno velik
 - Plus zasićenje; $V_{iz} = +V_{cc}$
 - Minus zasićenje; $V_{iz} = -V_{cc}$
- **Oblast linearnog rada je veoma uzana ($10 \mu V$)**

Komparator

Upoređivanje ulaznog napona sa nulom.

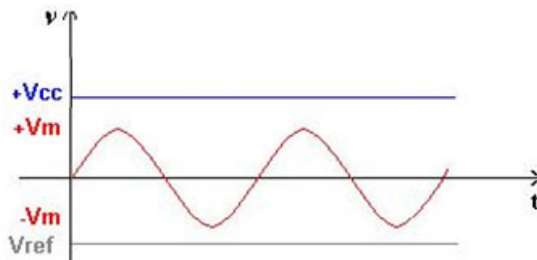
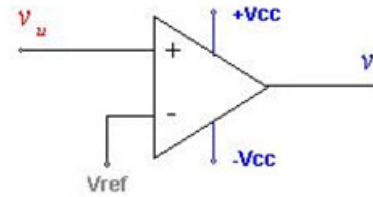
$$v_u = V_m \sin \omega t$$



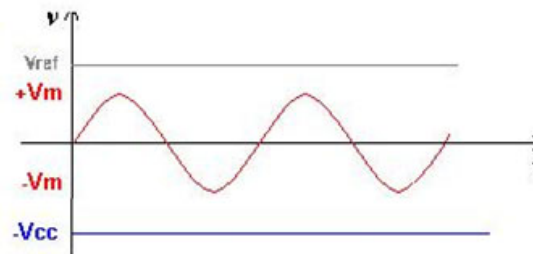
Komparator

Upoređivanje ulaznog napona sa V_{REF}

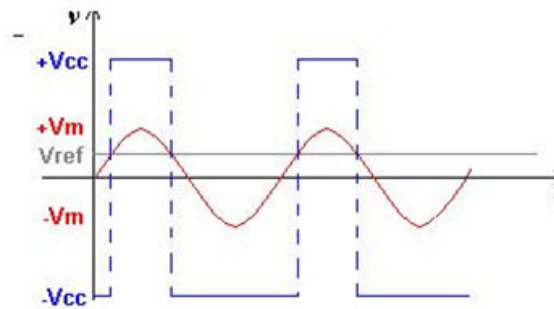
$$V_u = V_m \sin \omega t$$



a) $V_m > V_{ref}$

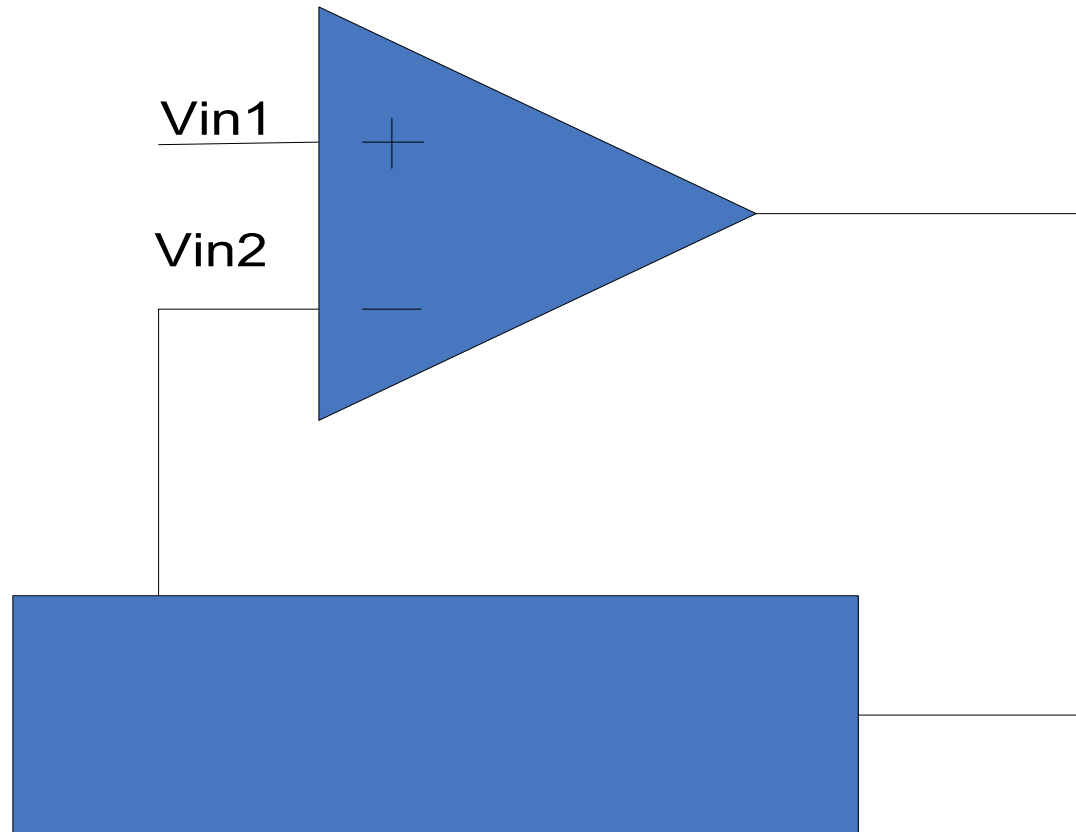


b) $V_m < V_{ref}$



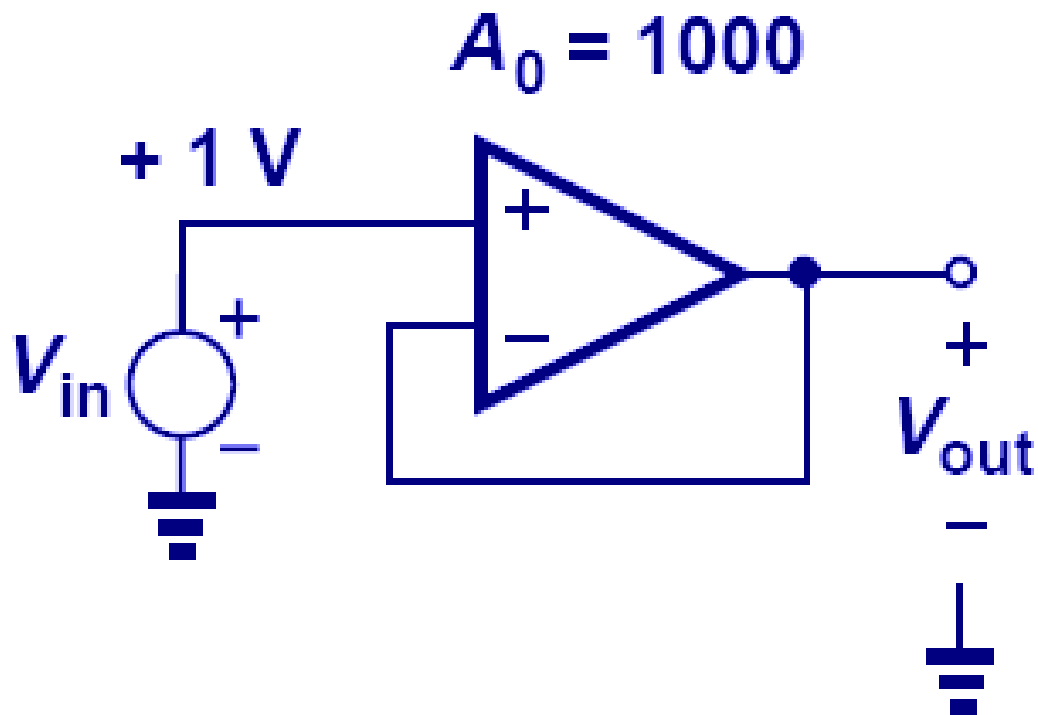
c) $-V_m < V_{ref} < V_m$

Virtuelna kratka veza



- Usljed velikog pojačanja OP-a, kolo sa NPS forsira V_{in2} da bude blisko V_{in1} .
- Formira se virtuelna kratka veza po naponu.

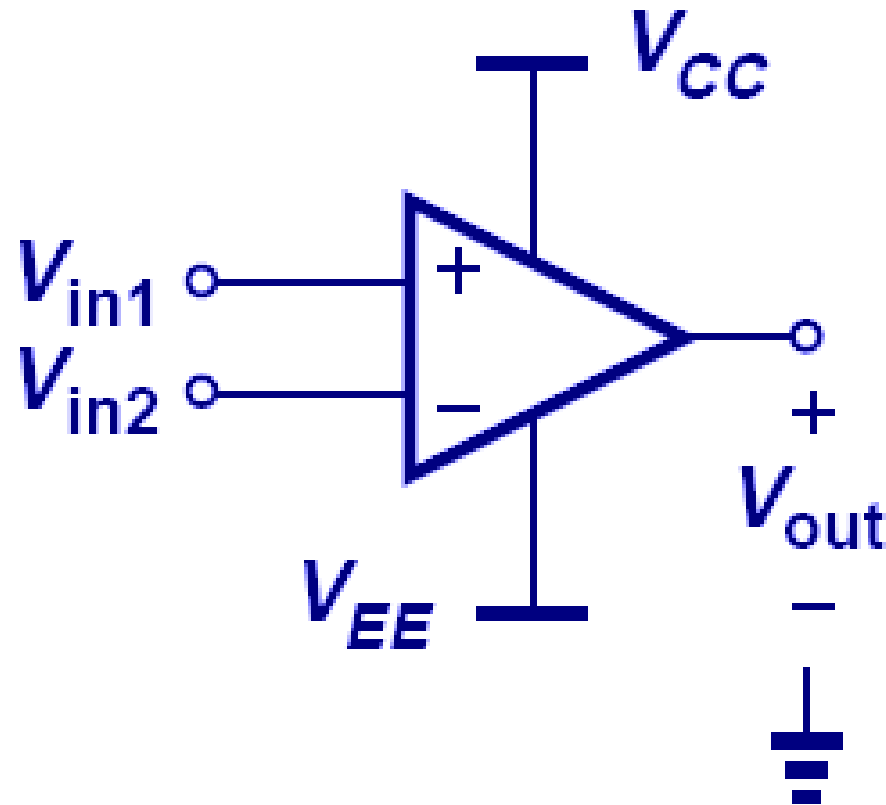
Jedinični pojačavač



$$V_{out} = A_0 (V_{in} - V_{out})$$

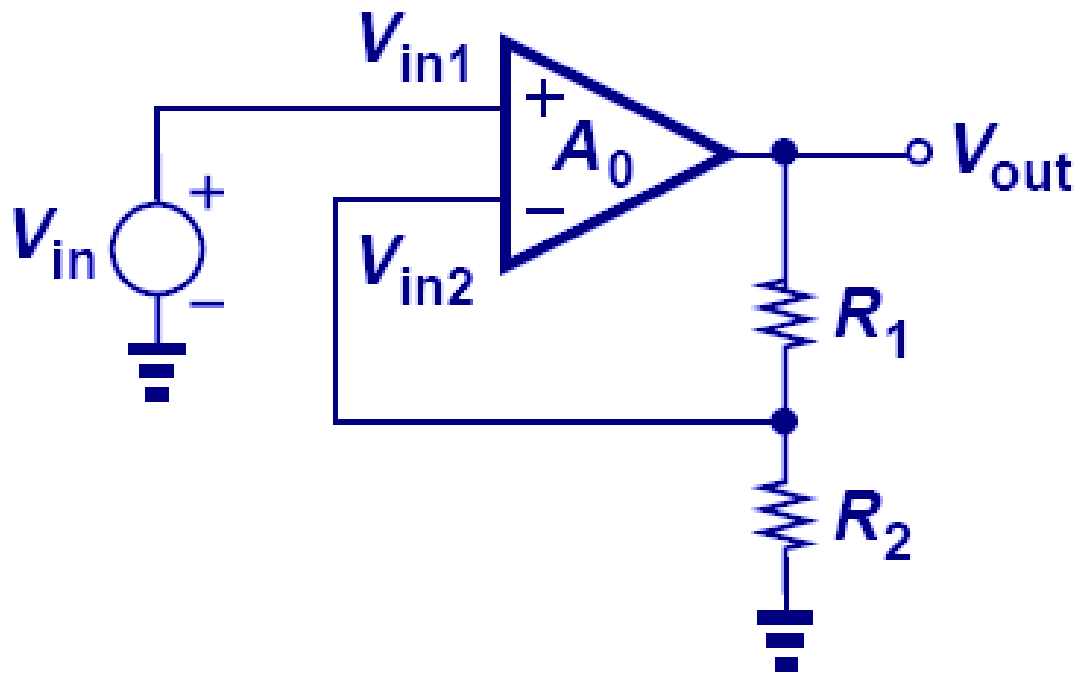
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{1 + A_0}$$

Prikazivanje napona napajanja



- U cilju prikazivanja napona napajanja, ucrtani su V_{CC} i V_{EE} .
- U nekim slučajevima, V_{EE} je nula.

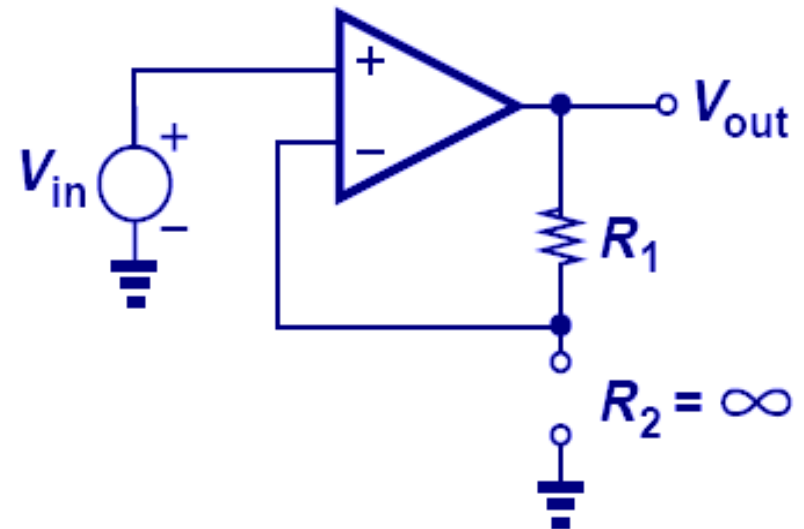
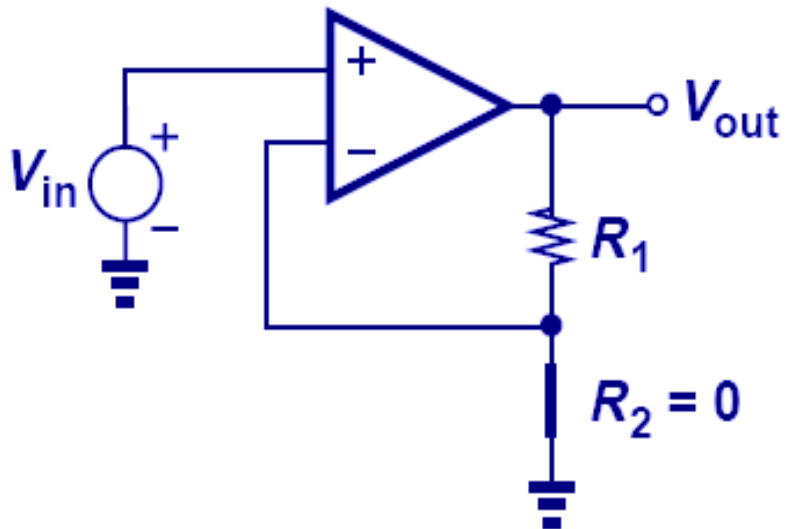
Neinvertujući pojačavač (beskonačno A_0)



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

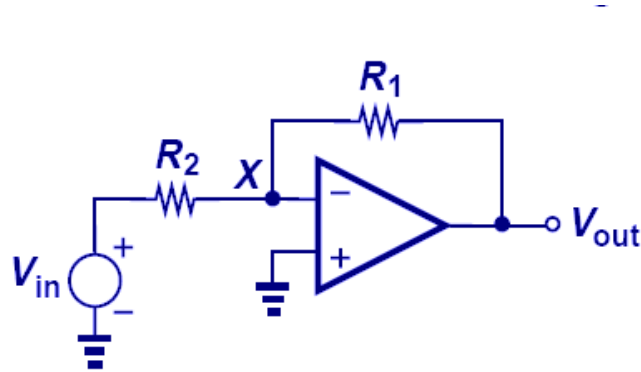
- Neinvertujući pojačavač, preko otporničkog razdjelnika vraća dio izlaznog signala na invertujući ulaz.
- Ako je pojačanje OP-a, A_0 veliko, odnos V_{out}/V_{in} zavisi jedino od odnosa otpornika.

Ekstremni slučajevi otpornika R_2 (beskonačno A_0)

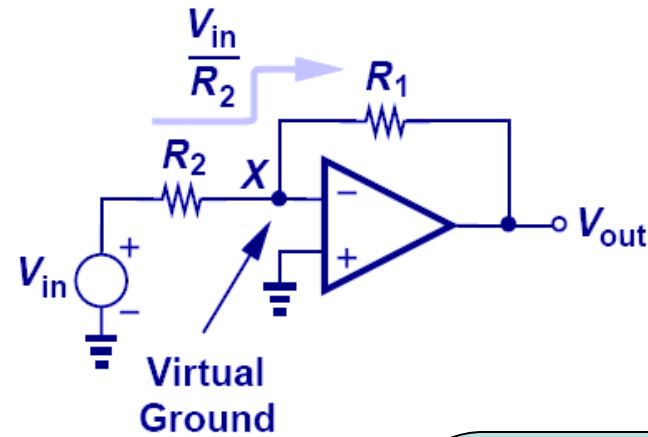


- Ako je $R_2=0$ nema vraćanja izlaznog signala na ulaz i odnos V_{out}/V_{in} je jednak pojačanju operacionog pojačavača.
- Ako je R_2 beskonačno veliko, kolo postaje jedinični pojačavač i odnos V_{out}/V_{in} postaje jednak 1.

Invertujući pojačavač



(a)



(b)



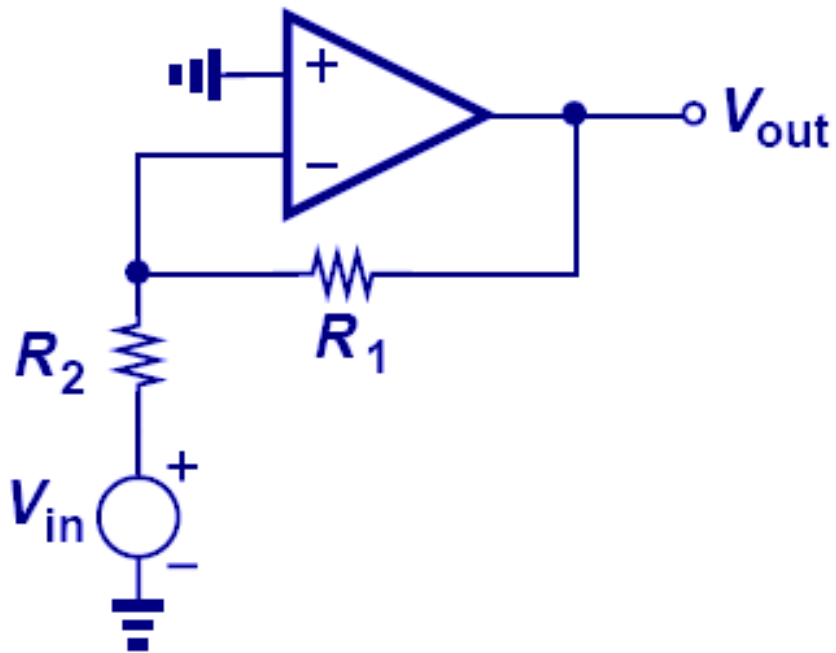
(c)

$$\frac{0 - V_{out}}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_2}$$

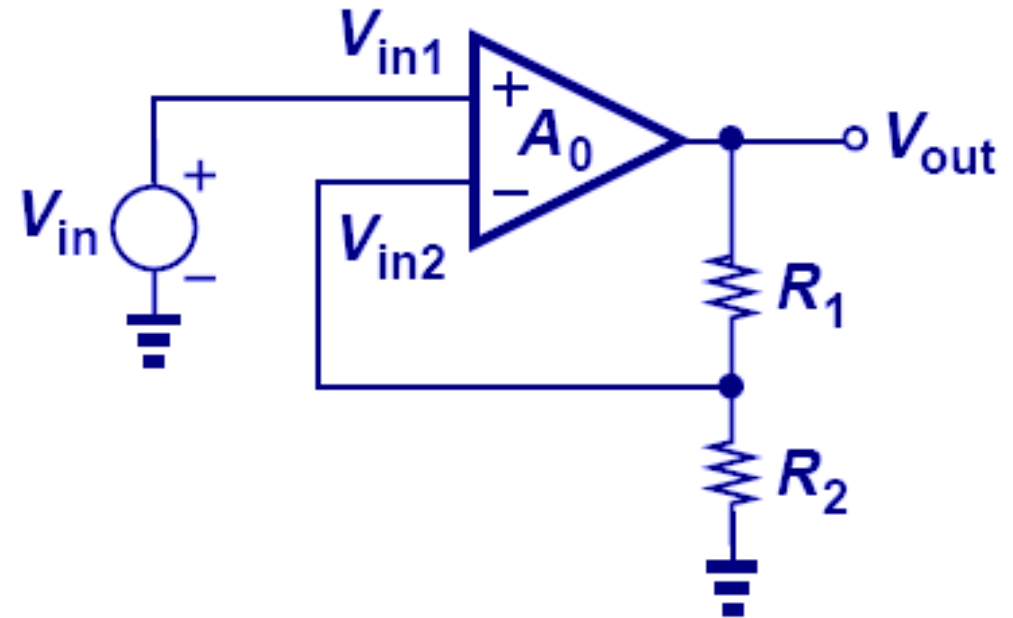
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_1}{R_2}$$

- Beskonačno A_0 forsira da negativni ulaz bude viruelna masa.

Invertujući/Neinvertujući pojačavač

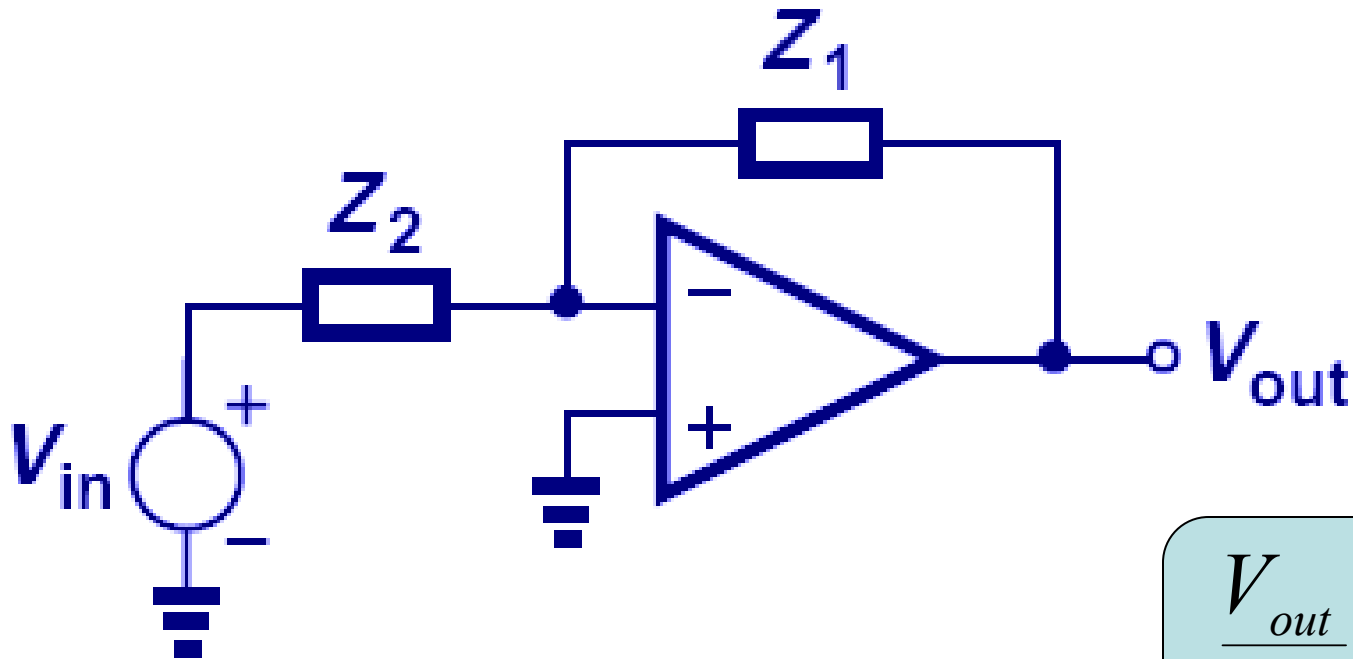


Invertujući



Neinvertujući

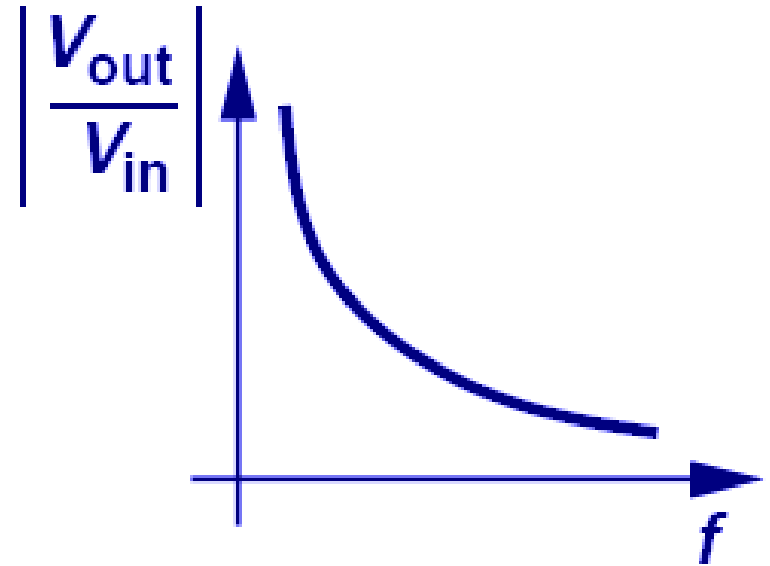
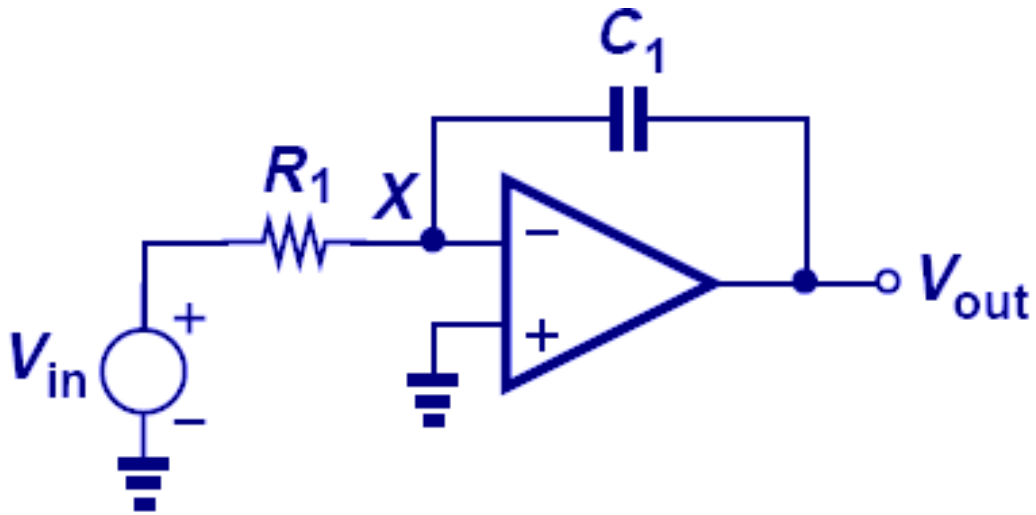
Kompleksne impedancije i OP



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx -\frac{Z_1}{Z_2}$$

- Pojačanje pojačavača i dalje je jednako odnosu dvije impedancije.

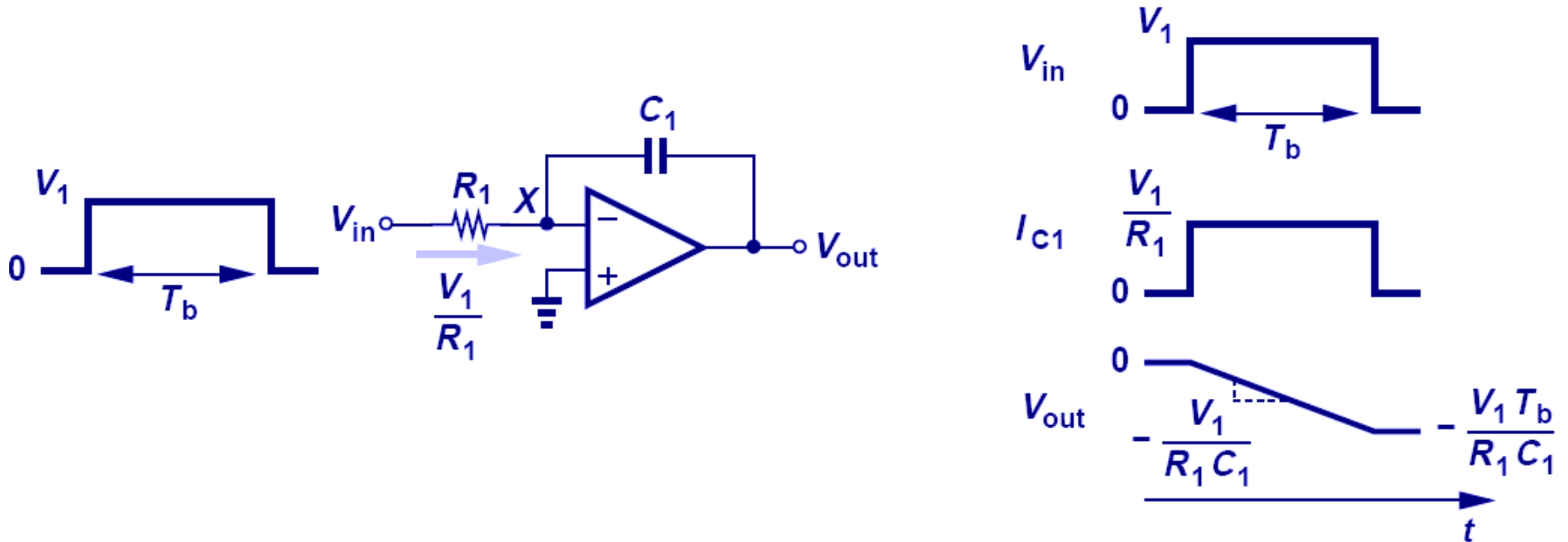
Integrator



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{R_1 C_1 s}$$

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt$$

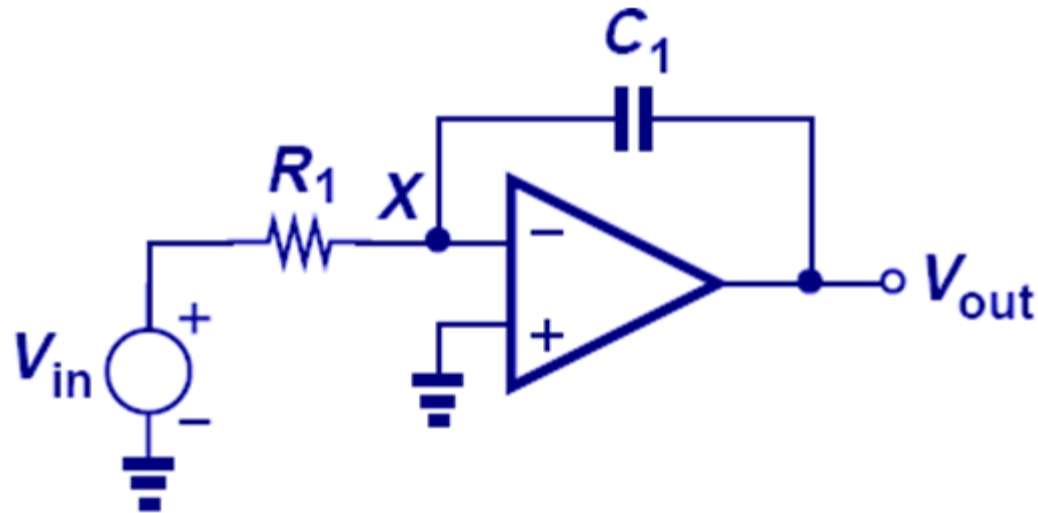
Integrator sa impulsnim signalom na ulazu



$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt = -\frac{V_1}{R_1 C_1} t$$

$$0 < t < T_b$$

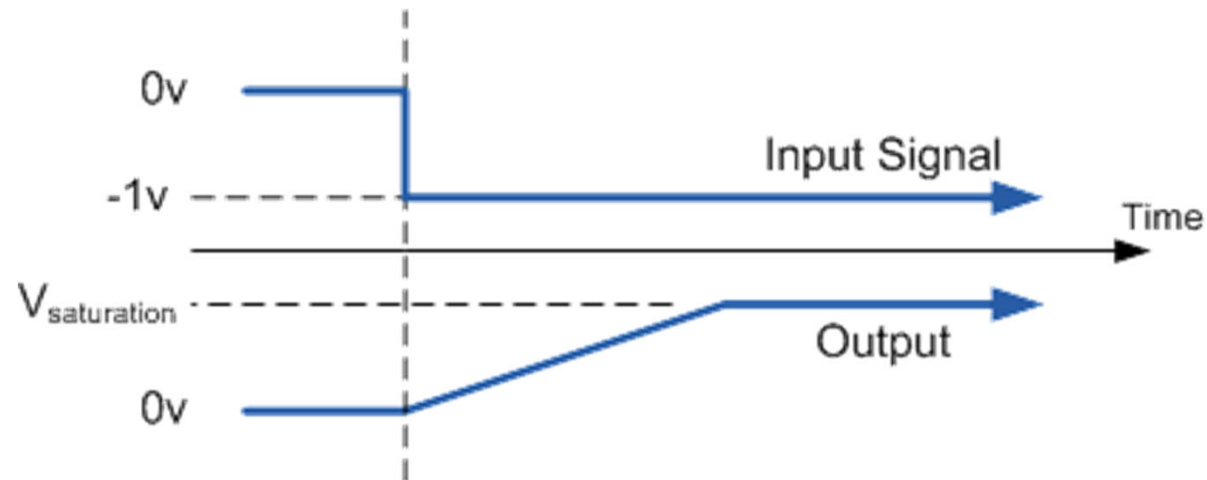
Integrator - pitanja



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

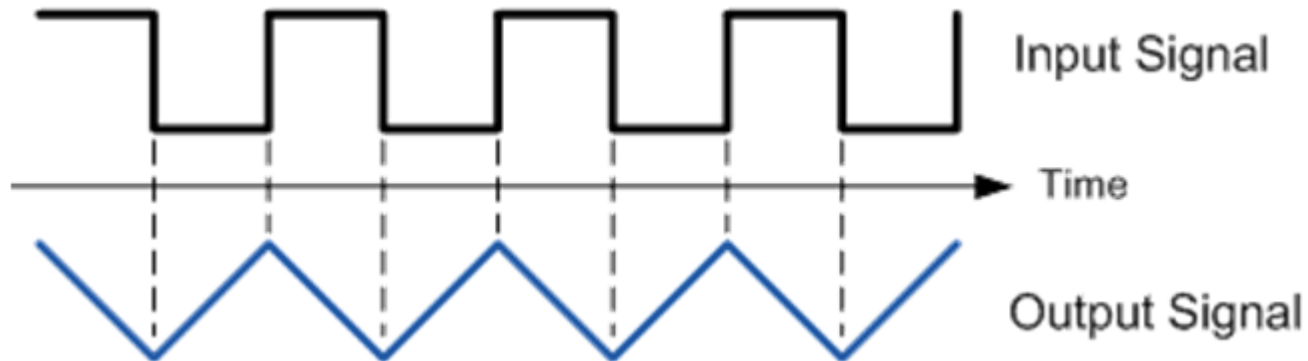
Integrator - odgovori

Odgovori:



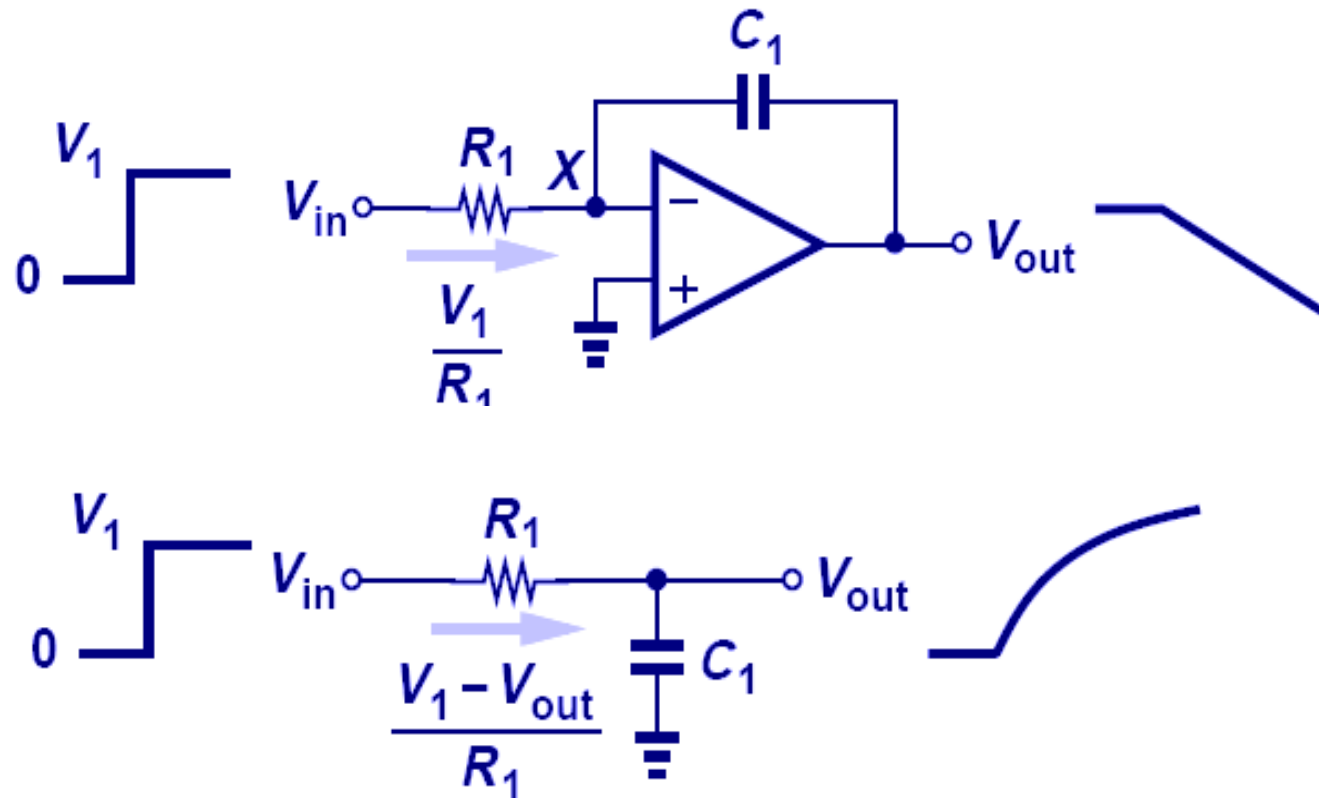
- Čak i kada bismo imali $V_{\text{in}}=0$, zbog nesavršenosti OP i njegovog V_{os} i I_{b} , i zbog šuma, integrator bi “nešto” integralio i izlazni napon bi otišao u zasićenje.

Generator funkcija



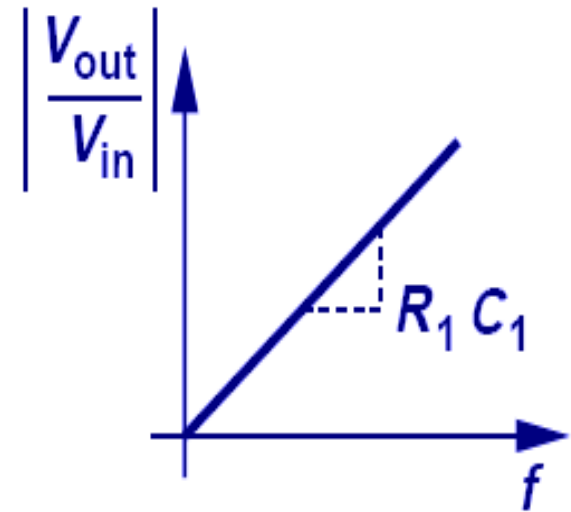
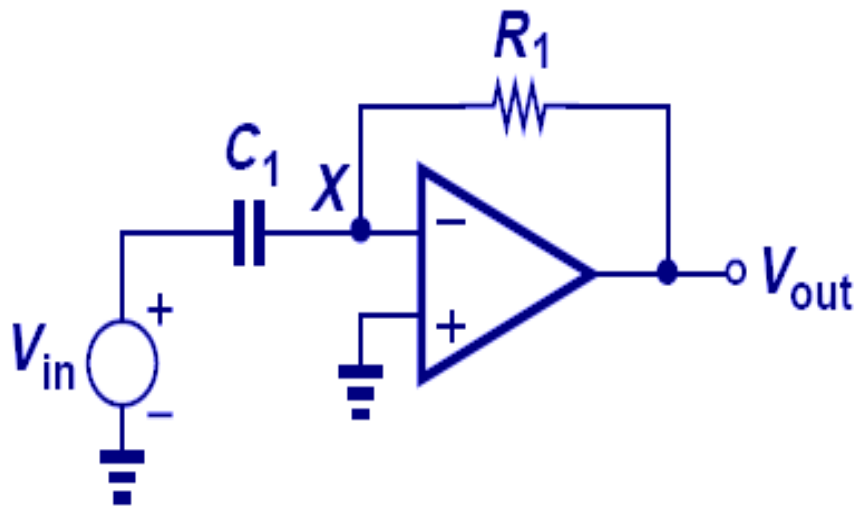
- Pomoću integratora možemo od četvrtki praviti trouglasti talasni oblik napona
- Od trouglastog možemo praviti parabolični oblik, itd.

Poređenje integratora i RC NF filtra



- RC NF filter je u stvari “pasivna” aproksimacija integratora.
- Sa dovoljno velikom RC vremenskom konstantom, napon na izlazu RC NF filtra postaje sličan onom na izlazu integratora.

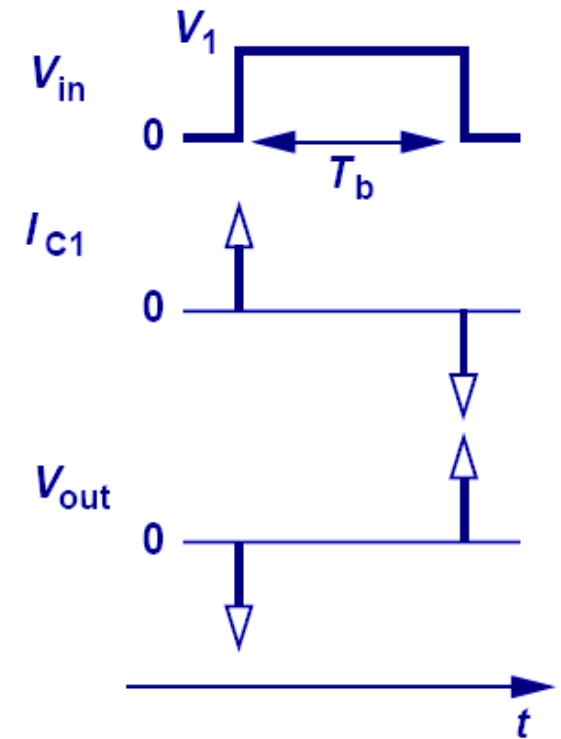
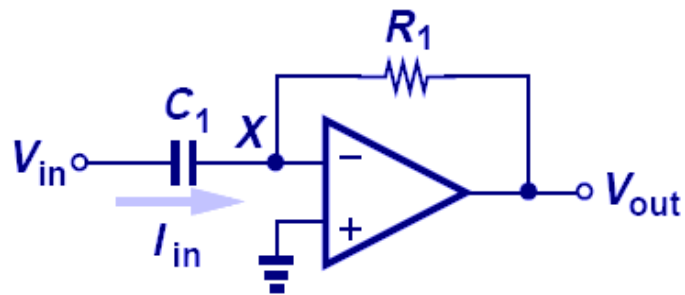
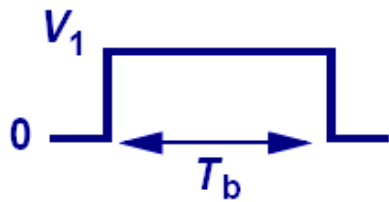
Diferenciator



$$V_{out} = -R_1 C_1 \frac{dV_{in}}{dt}$$

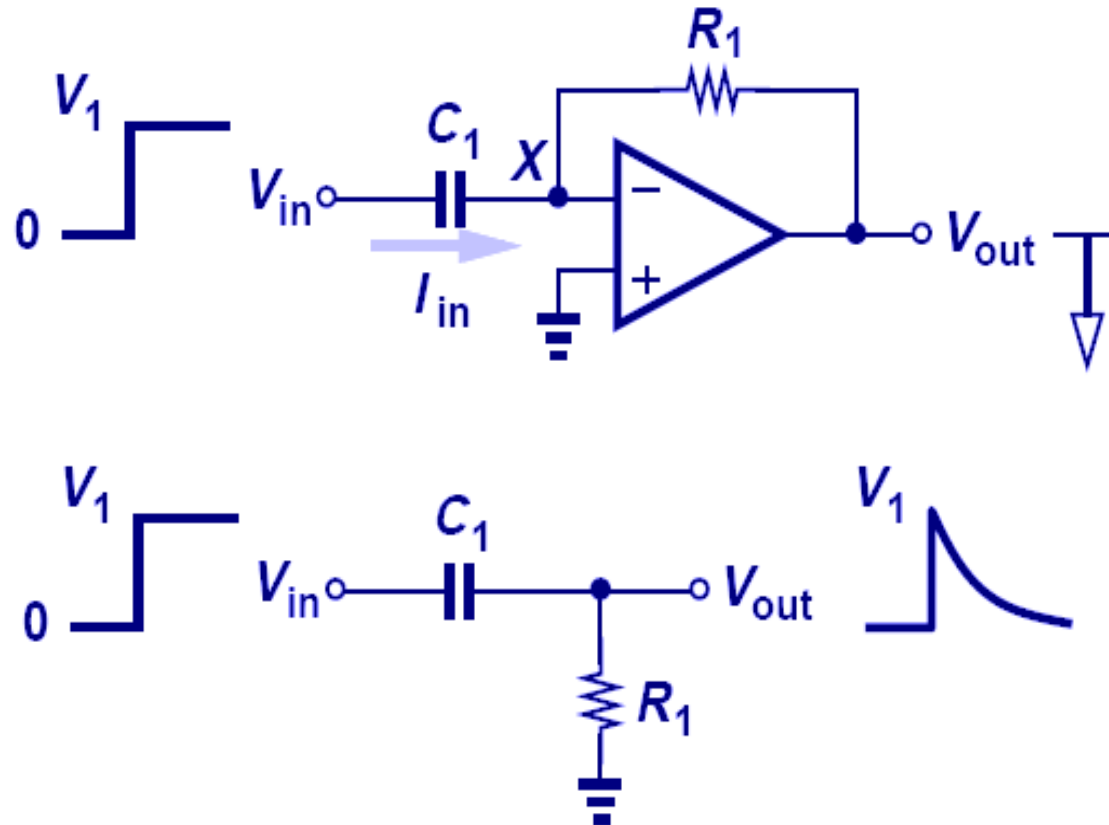
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_1}{\frac{1}{C_1 s}} = -R_1 C_1 s$$

Diferenciator i impuls na ulazu



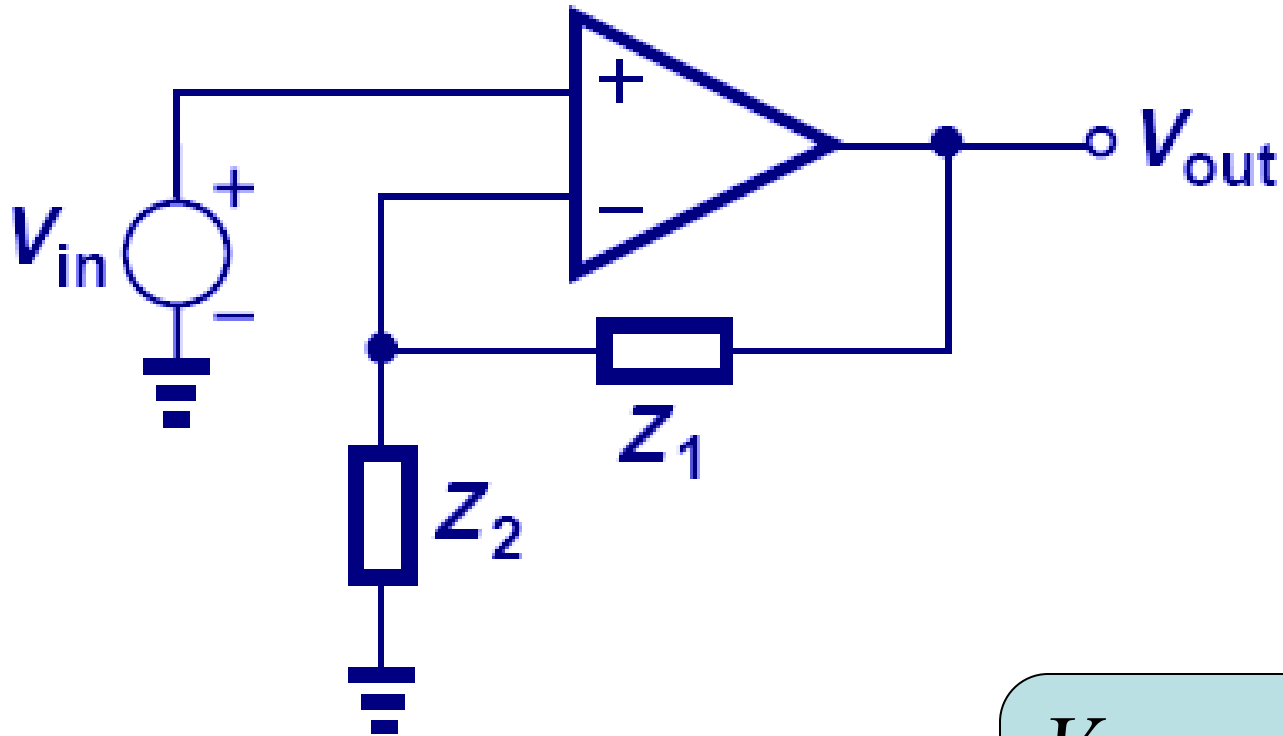
$$V_{out} = \mp R_1 C_1 V_1 \delta(t)$$

Poređenje diferenciatora i HF filtra



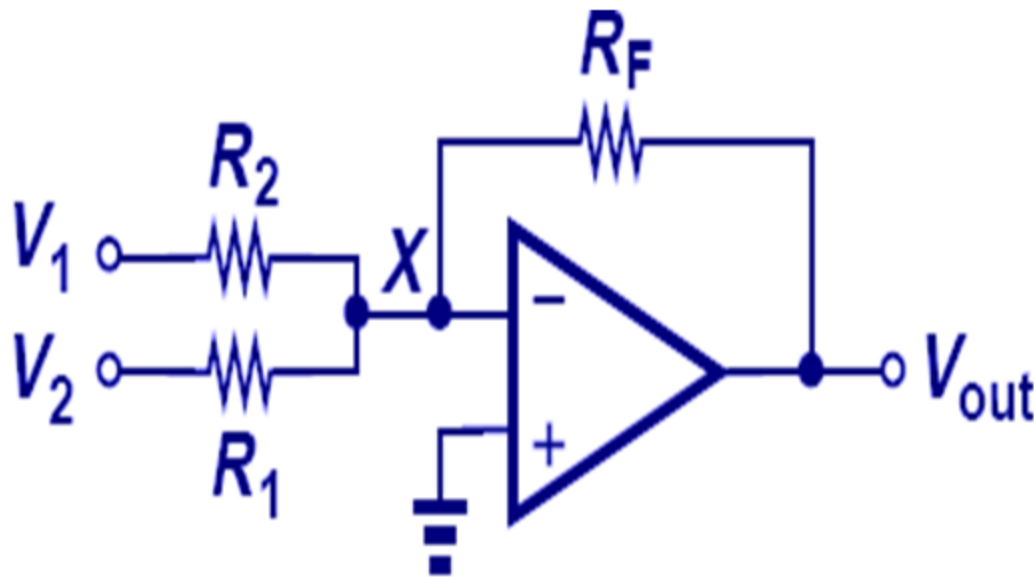
- RC HF filter je zapravo pasivna aprokcimacija diferenciatora.
- Kada je vremenska konstanta RC dovoljno mala, RC filter aproksimira diferencijator.

Neinvertujući pojačavač i kompleksne impedanse



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$$

Sabirač



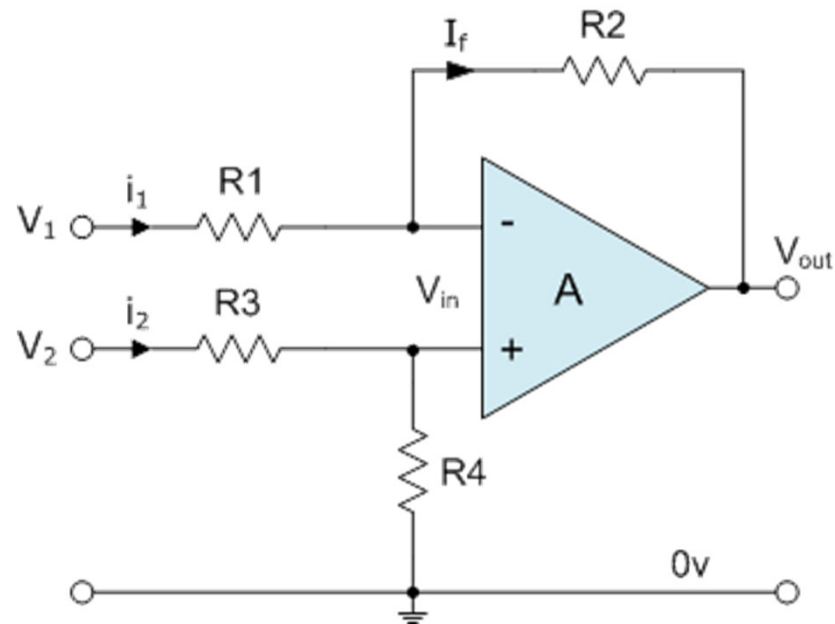
$$V_{out} = -R_F \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

$$V_{out} = -\frac{R_F}{R} (V_1 + V_2)$$

Ako je $R_1 = R_2 = R$

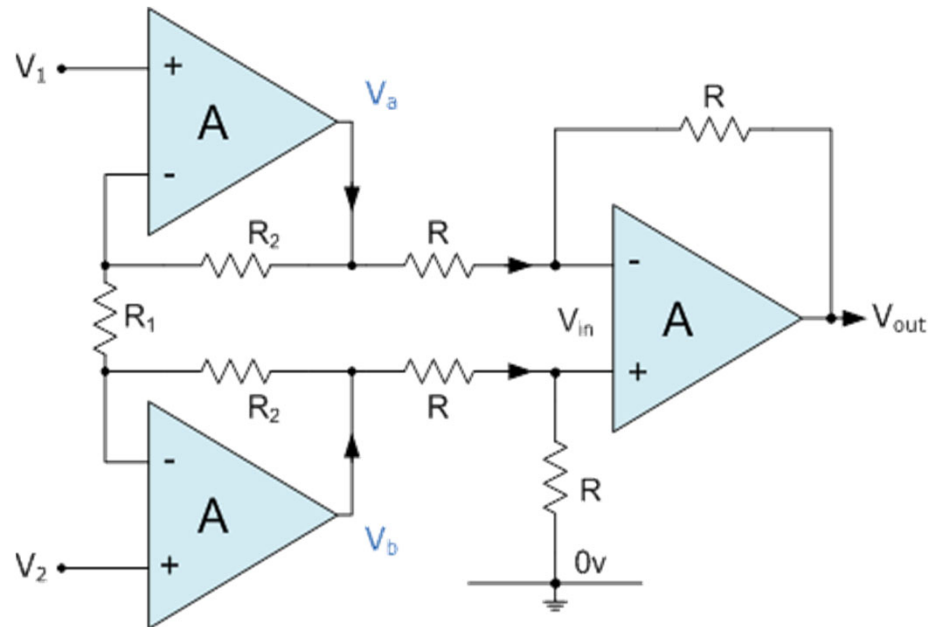
- **X je virtuelna masa, Struja proporcionalna sa V_1 i V_2 će uticati u X i zatim preko R_F proizvoditi izlazni napon proporcionalan sumi dva ulazna napona.**

Diferencijalni pojačavač – za vježbu



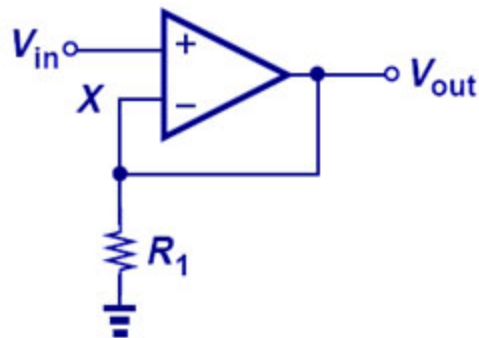
- Naći opšti izraz za V_{out} .
- Koliko je diferencijalno pojačanje A_{dif} , a koliko sinfazno pojačanje A_{com} ?
- Zatim postaviti uslov $A_{com}=0$.
- Dobiće se $R_1/R_2=R_3/R_4$.

Instrumentacioni pojačavač – za vježbu

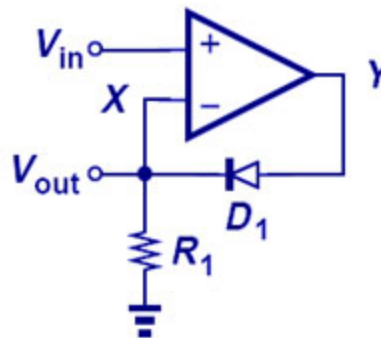


- Ulazni stepen sa 2 OP osigurava visoku ulaznu otpornost
- Omogućava podešavanje pojačanja samo sa jednim otpornikom (R_1).
- Drugi (diferencijalni) stepen pravi izlazni signal prema masi

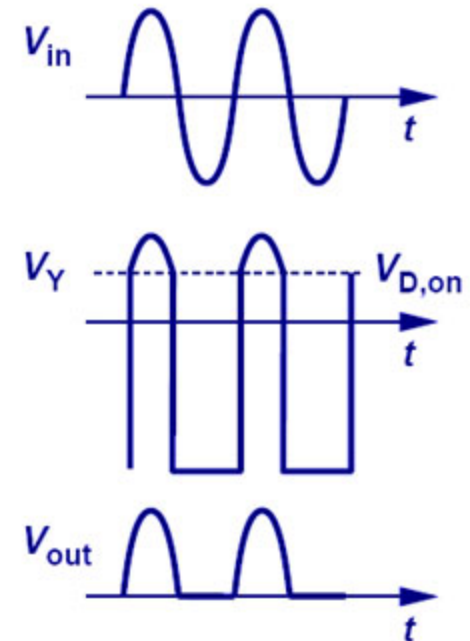
Precizni ispravljač



a)

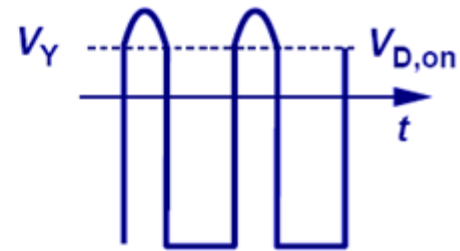
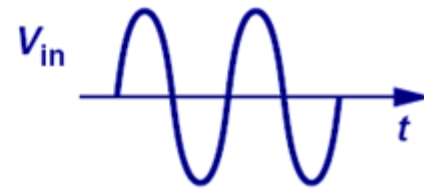
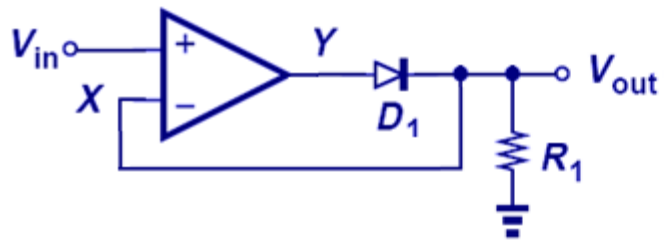


b)

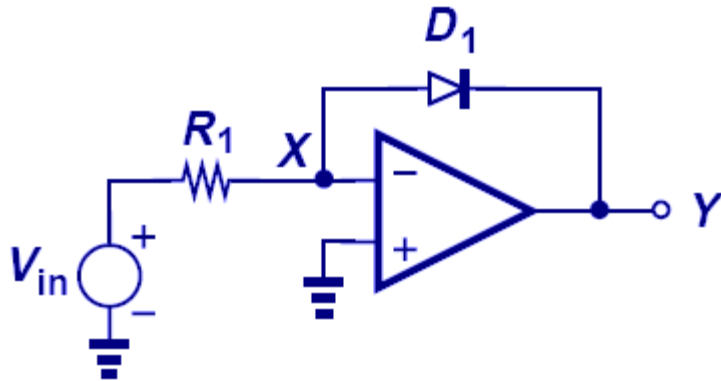


- Kada je V_{in} pozitivan, kolo b) se ponaša kao kolo a), tako da izlaz prati ulaz.
- Kada je V_{in} negativan, diode je prekid, i izlaz pada na 0V, dok izlaz OP-a ide u negativno zasićenje.
- Tako se obavlja ispravljanje.

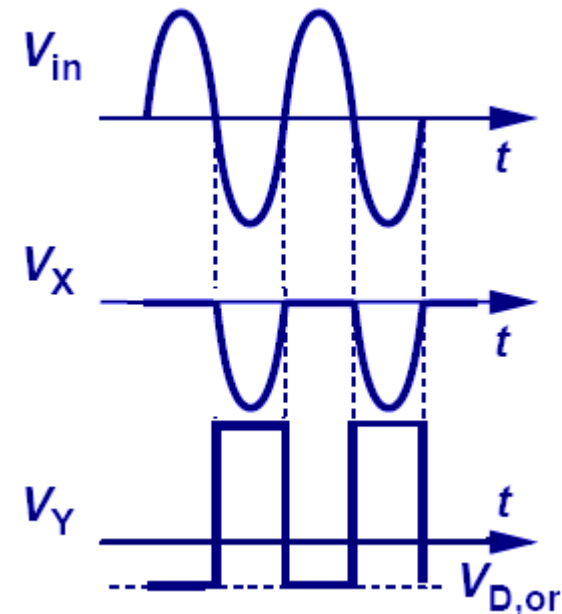
Idealna dioda



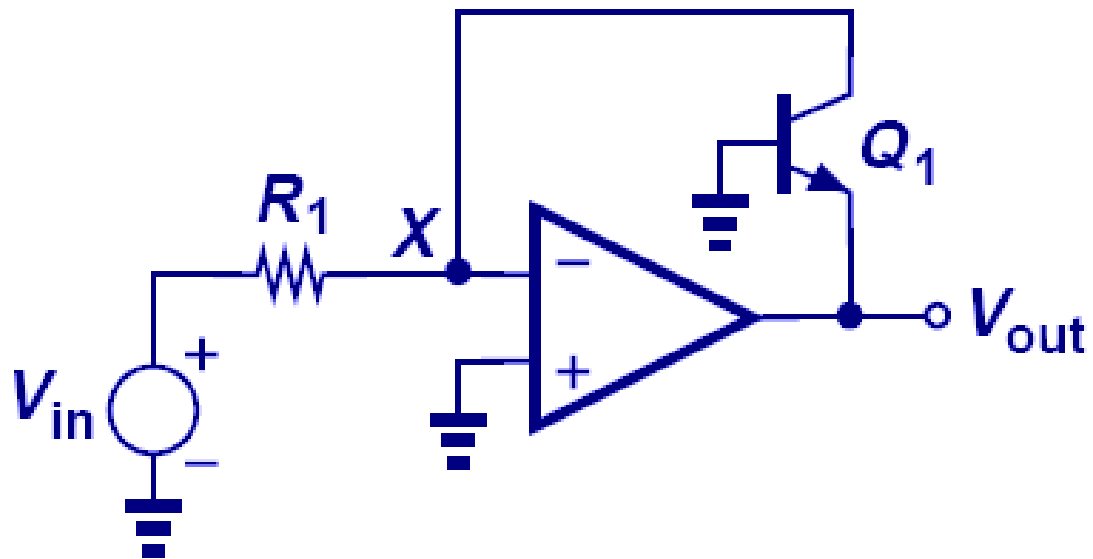
Invertujući precizni ispravljač



- Kada je V_{in} pozitivan, diode provodi, V_y je jednako $-V_{D,on}$, i V_x je virtuelna masa.
- Kada je V_{in} negativan, dioda je zakočena, V_y ide u pozitivno zasićenje, V_x postaje jednako V_{in} .



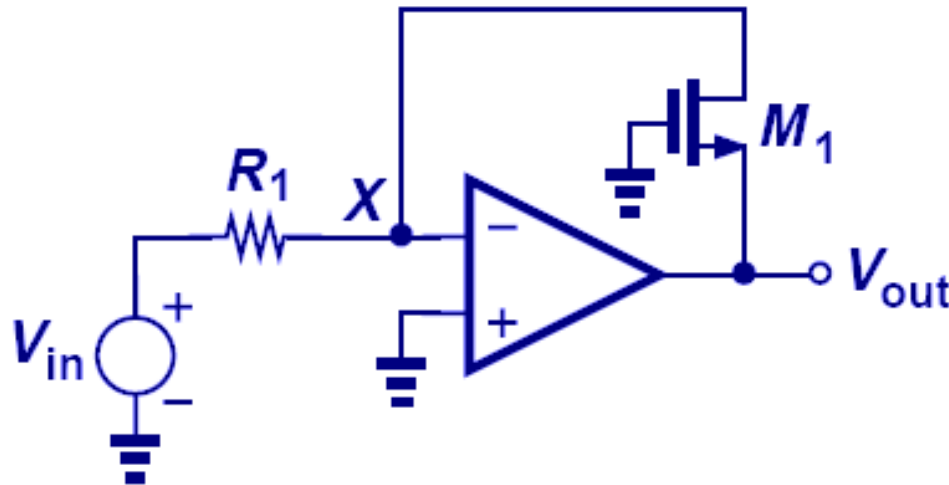
Logaritamski pojačavač



$$V_{out} = -V_T \ln \frac{V_{in}}{R_1 I_S}$$

- Umetanjem bipolarnog tranzistora u povratnu granu, dobija se pojačavač sa logaritamskom karakteristikom.
- Ovo je posledica toga što je strujno naponska karakteristika bipolarnog tranzistora prirodni logaritam.
- Izvesti izraz!

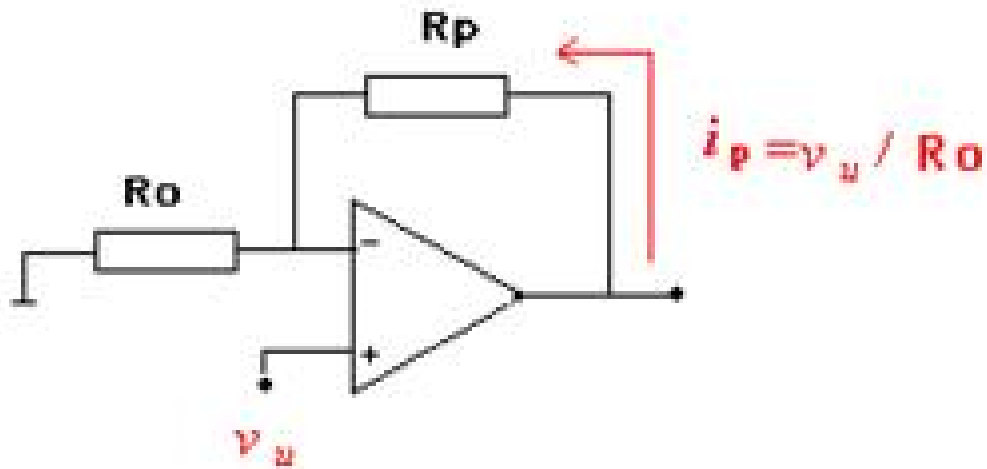
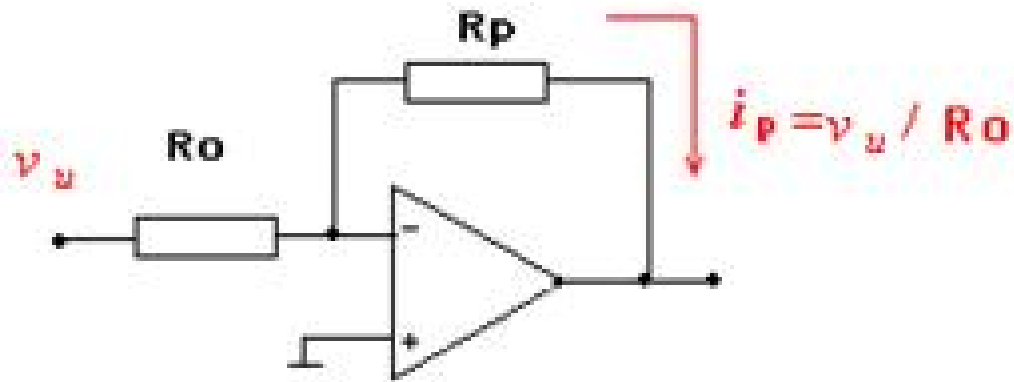
Kolo za korjenovanje



$$V_{out} = - \sqrt{\frac{2V_{in}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_1}} - V_{TH}$$

- Zamjenom bipolarnog tranzistora sa MOSFET-om, pojačavač dobija karakteristiku funkcije korjenovanja.
- Ovo je tako, jer je strujno-naponska konverzija MOSFET-a kvadratni korijen.
- Izvesti izraz!

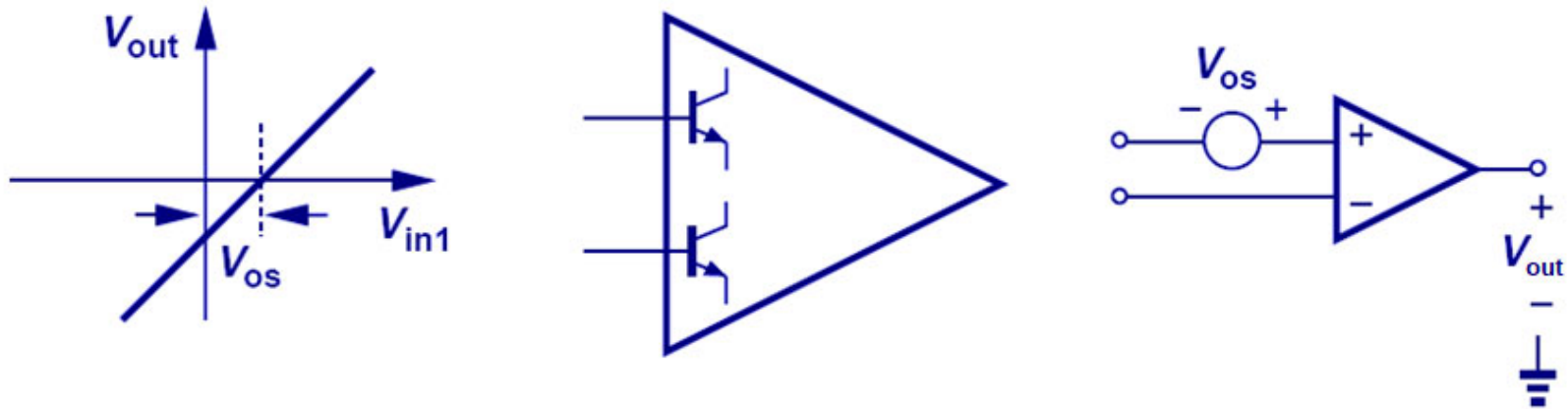
Konvertor napona u struju



Nesavršenosti OP

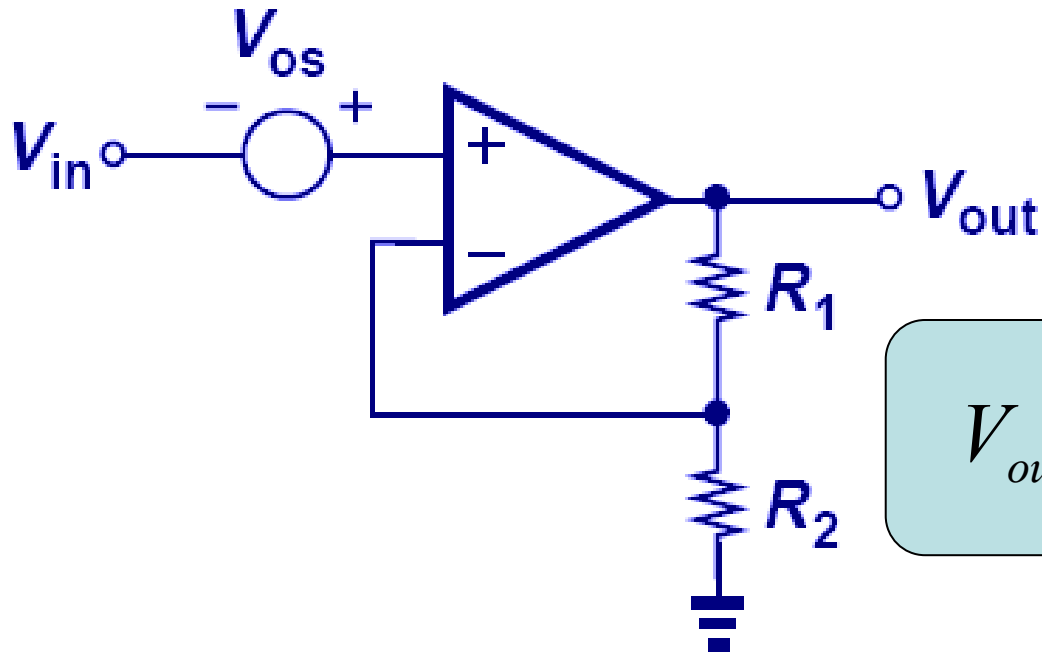
- **DC ofset**
- **Ulazne polarizacione struje**
- **Ograničenje brzine**
- **Konačne ulazne i izlazne impedanse**

DC Offsets



- DC offset u OP se javlja usljed neidealnog podudaranja u ulaznom diferencijalnom stepenu, što izaziva odstupanje ulazno-izlazne karakteristike u pozitivnom ili negativnom smjeru.
- Na slici je prikazano odstupanje u pozitivnom smjeru.

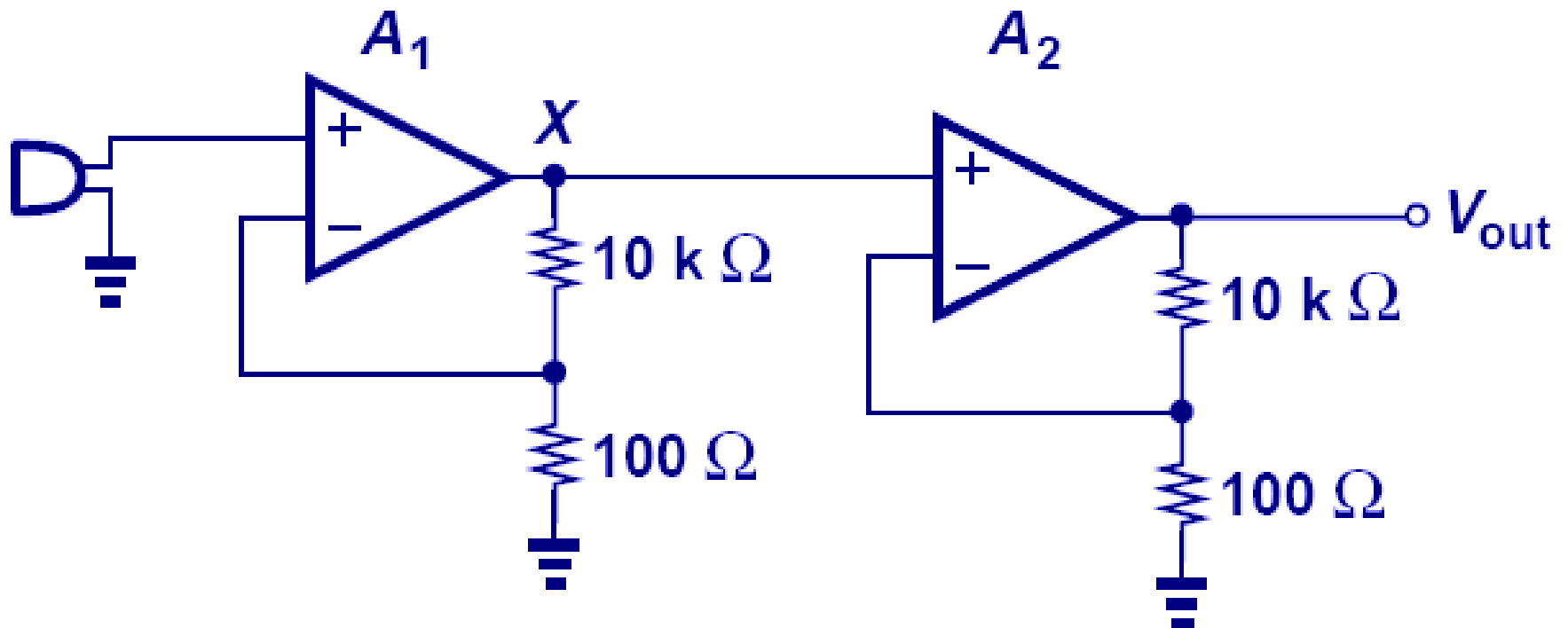
Efekat DC ofseta



$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (V_{in} + V_{os})$$

- Kao što se vidi, kolo pojačava DC offset jednako kao i ulazni signal.
- Tako se pojačava i greška.

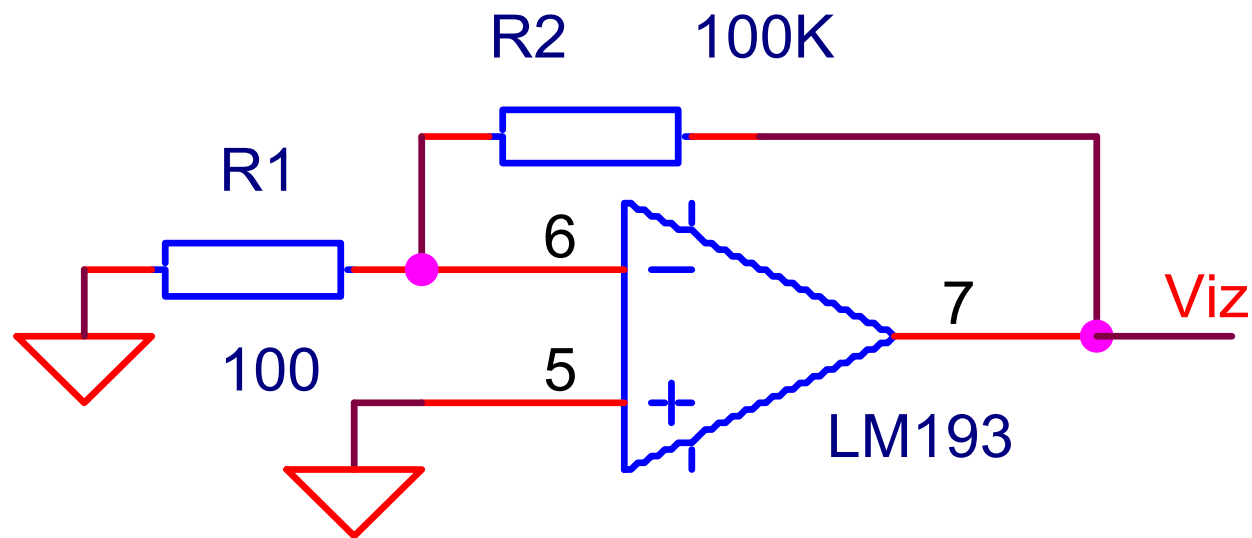
Zasićenje usljed DC ofseta



- Kako se offset pojačava kao i ulazni signal, izlazni napon prvog pojačavačkog stepena može odgurati drugi pojačavački stepen u zasićenje.

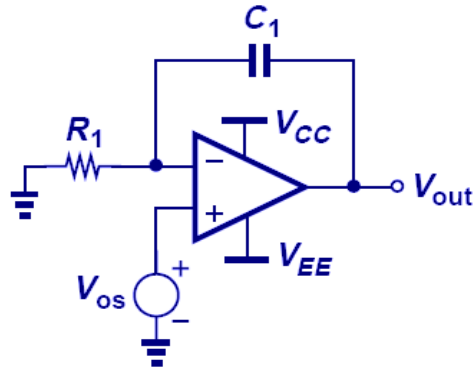
DC ofset

Zadatak:

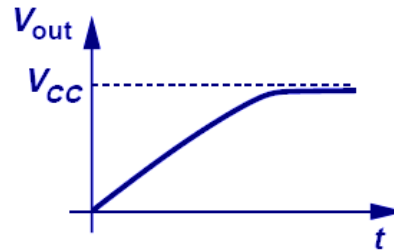


- Ako je izlazni napon +2V, kolika je ulazna naponska razdešenost $V_{os}=?$ [mV]

Ofset u integratoru

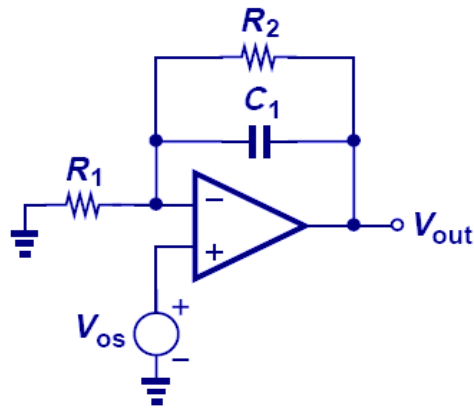


(a)

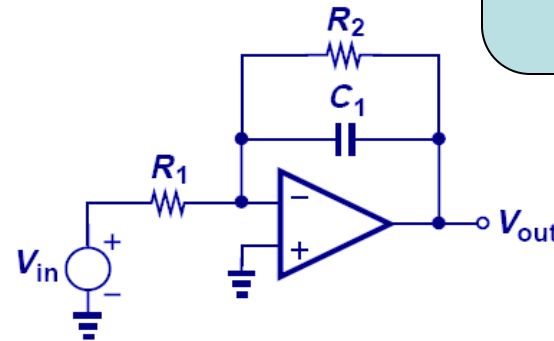


(b)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_2 C_1 s + 1}$$



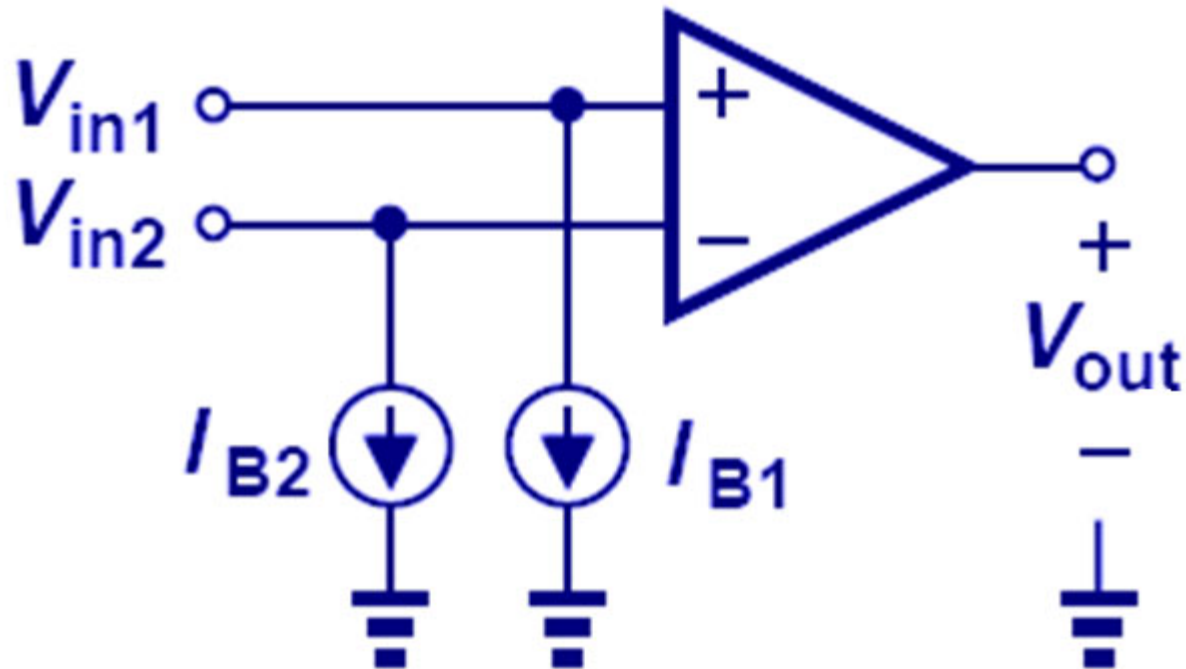
(c)



(d)

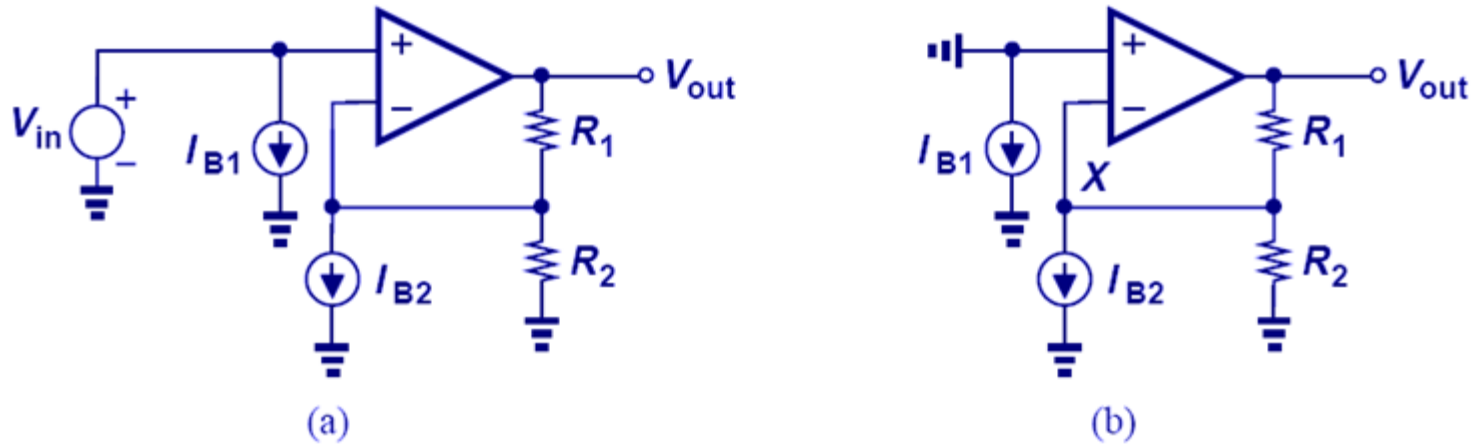
- U cilju “apsorbovanja” ofseta, može se dodati otpornik u paraleli sa kondenzatorom.
- Međutim, to uzrokuje da prenosna funkcija više nema pol na nultoj učestanosti.

Ulazne bipolarne polarizacione struje



- Efekat ulaznih bipolarnih polarizacionih struja može se modelirati strujnim izvorima spojenim od ulaznih priključaka ka masi.

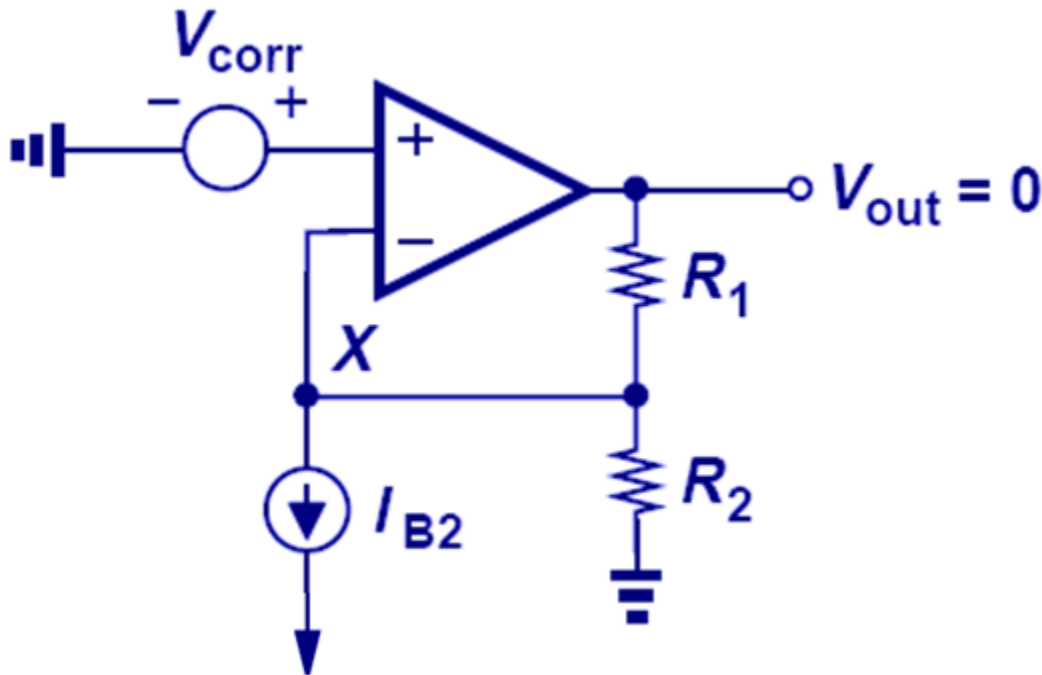
Uticaj ulaznih polarizacionih struja na neinvertujući pojačavač



$$V_{out} = R_1 I_{B2}$$

- Ispada da I_{B1} nema efekta na izlaz, dok I_{B2} proizvodi pad napona na otporniku R_1 .

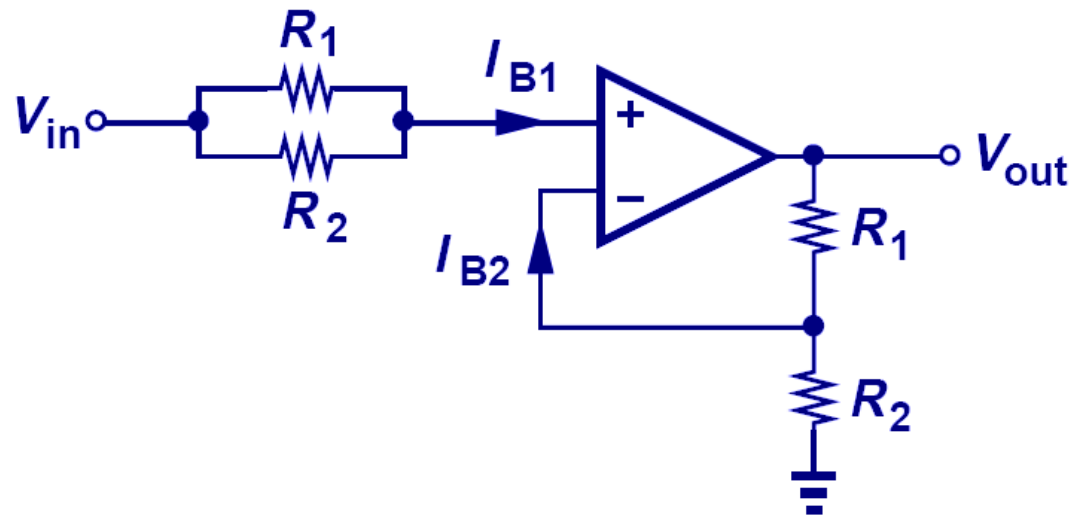
Uklanjanje uticaja ulazne polarizacione struje



$$V_{out} = V_{corr} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + I_{B2} R_1$$

- Uticaj ulazne polarizacione struje se može eliminisati umetanjem koekrekcionog napona u seriji sa pozitivnim ulazom.
- Da vi napon na izlazu bio nula, treba biti $V_{corr} = -I_{B2}(R_1 || R_2)$.

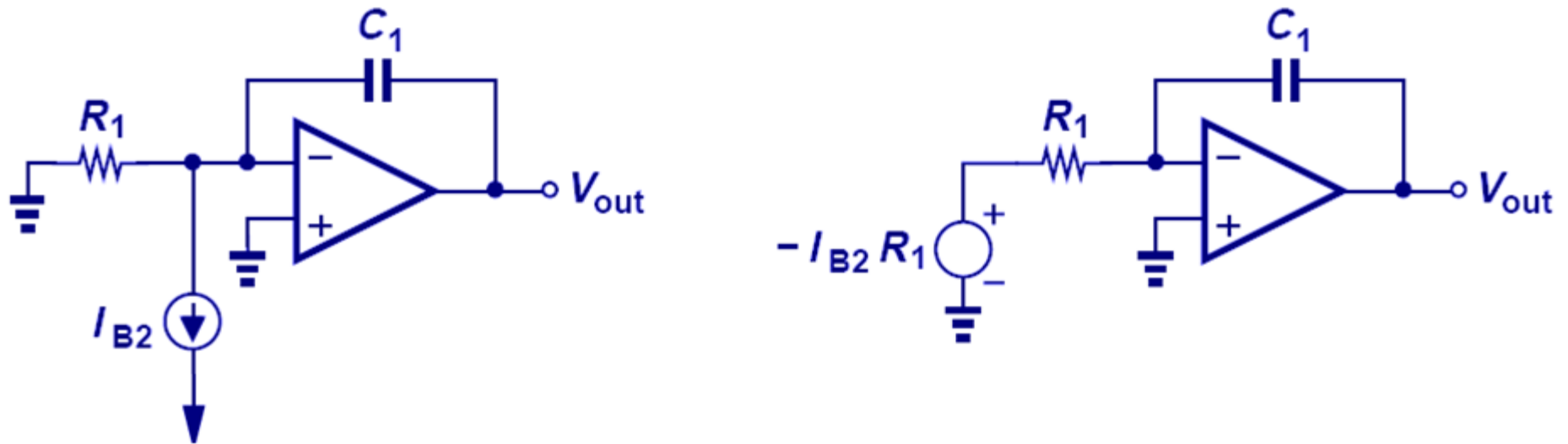
Korekcija sa paralelnom vezom otpornika



$$I_{B1} = I_{B2}$$

- Ukoliko se uzme da je $I_{B1} = I_{B2}$, što je uglavnom u redu, bolje je korekciju izvršiti paralelnom vezom otpornika R_1 i R_2 .

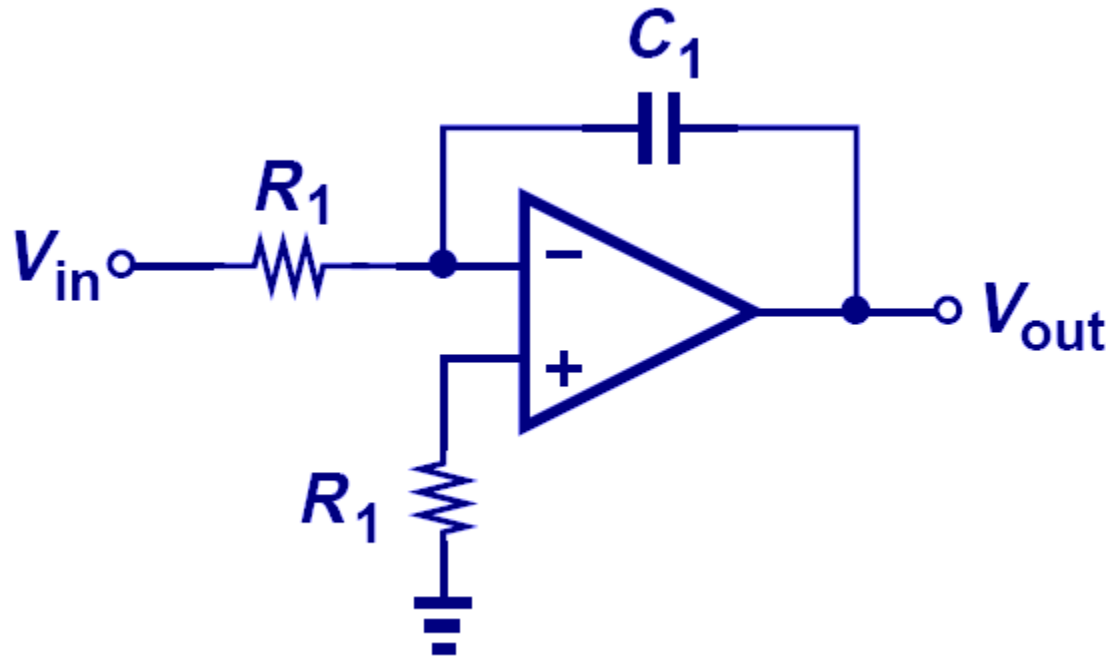
Uticaj ulaznih polarizacionih struja na integrator



$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int (-I_{B2} R_1) dt$$

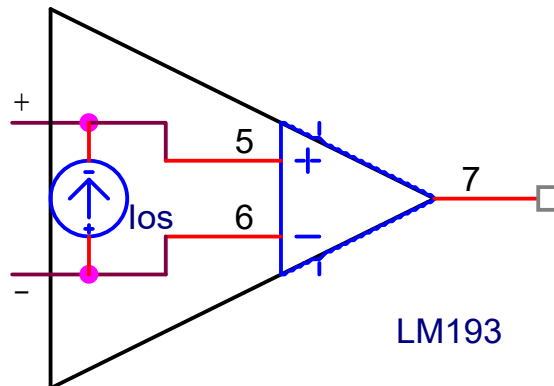
- **Ulazna polarizaciona struja će biti integrirana u integratoru i eventualno zasititi pojačavač.**

Eliminisanje uticaje ulazne struje polarizacije na integrator



- Umetanjem otpornika u seriju sa pozitivnim ulazom, uticaj ulazne struje polarizacije će biti eliminisan.
- Međutim, usljed efekata kao što je ulazna razdešenost, i drugih, izlaz pojačavača će ipak otići u zasićenje.

Razdešenost ulaznih struja



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 $v_+ = v_-$ ($v_{OS} = 0$)**. Reda je 20 nA.

Temperaturno klizanje



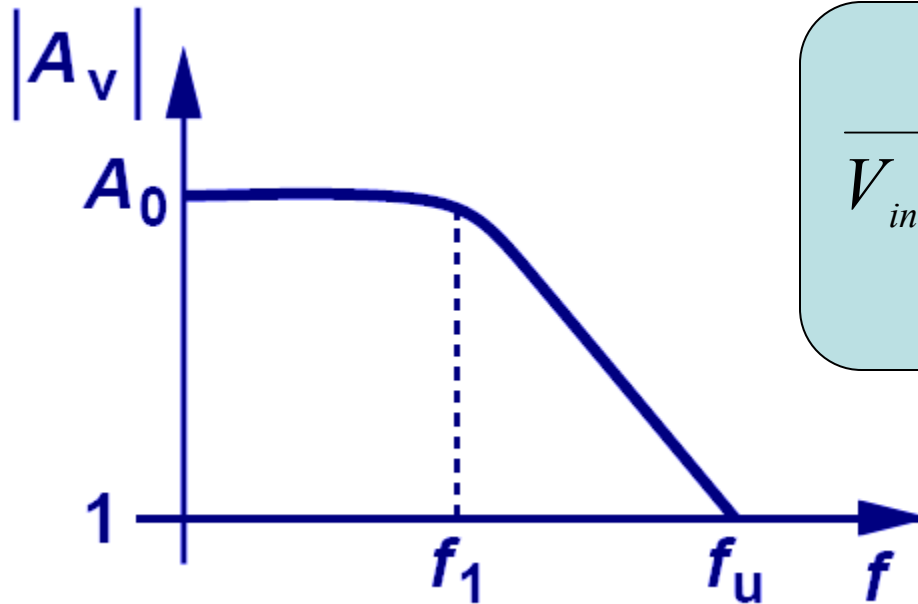
- Sve nesavršenosti (ulazna struja, razdešenost napona i struje) mijenjaju se sa promjenom temperature. Ovo se zove temperaturno klizanje (drift) $\Delta I_b/T$, $\Delta V_{os}/T$, $\Delta I_{os}/T$.
- Temperaturno klizanje se izražava u jedinicama $\text{pA}/^\circ\text{C}$ ili $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

CMRR

CMRR - Faktor potiskivanja srednje vrijednosti napona.

- 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
$$\text{CMRR} = A_d / A_s$$
- Jako dobri pojačavači imaju **CMRR** reda **100 dB**

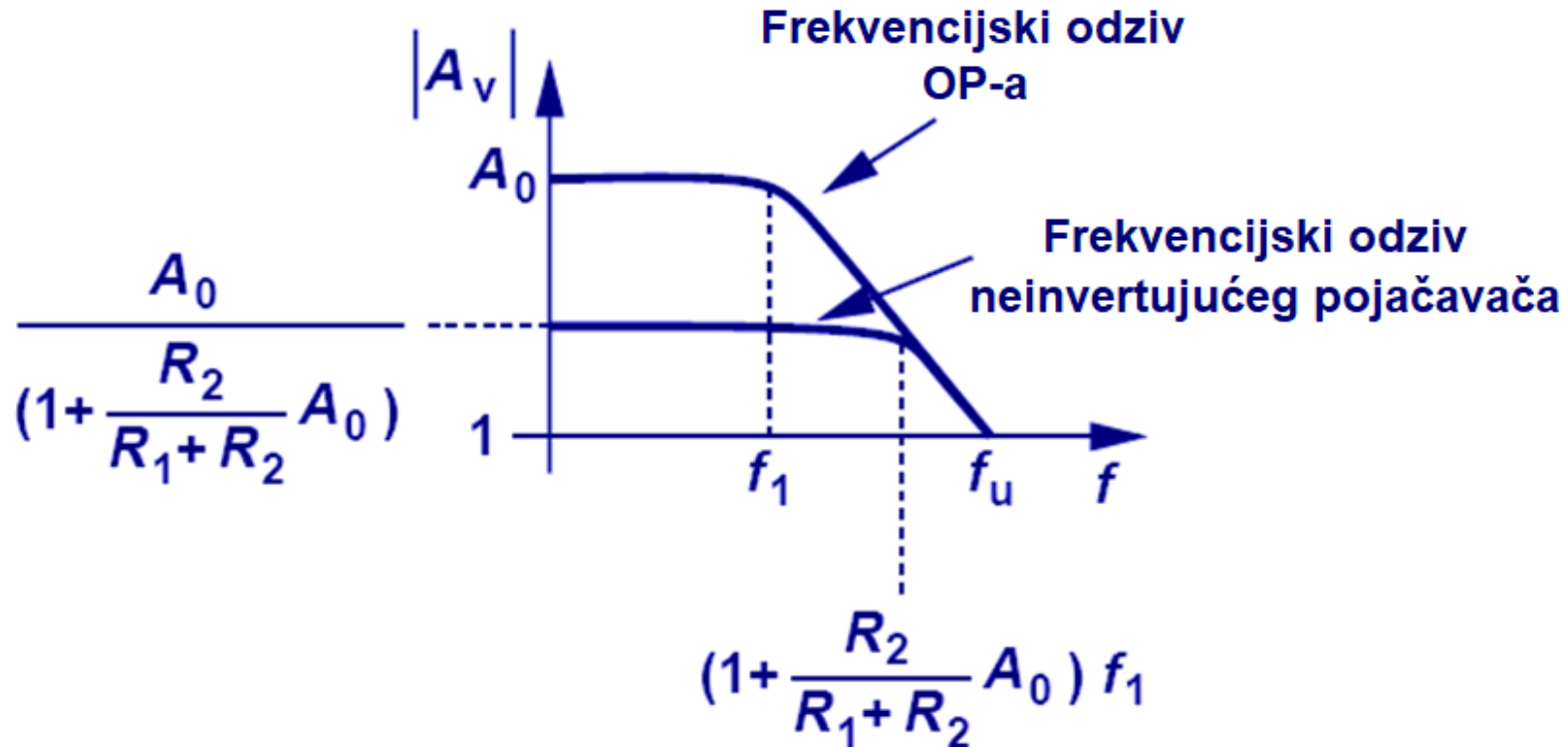
Ograničenje brzine



$$\frac{V_{out}}{V_{in1} - V_{in2}}(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_1}}$$

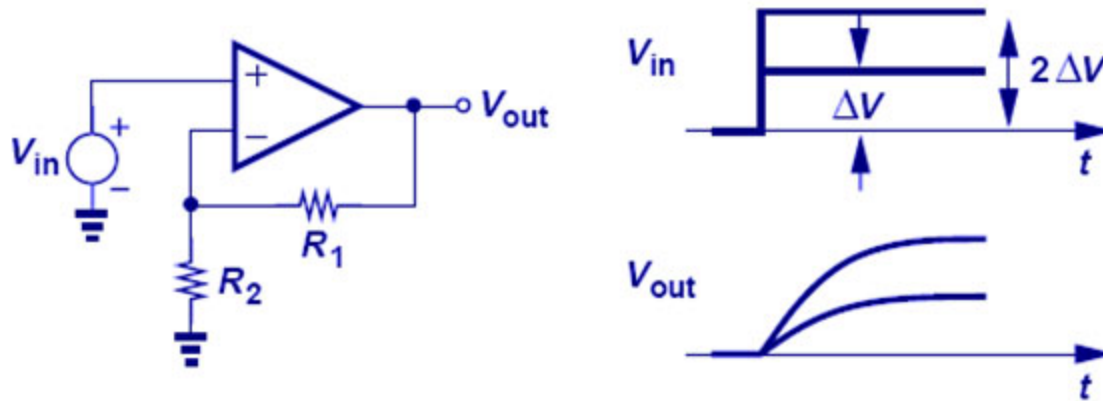
- Zbog internih kapacitivnosti, pojačanje OP opada sa porastom učestanosti ulaznog signala.

Propusni opseg i pojačanje



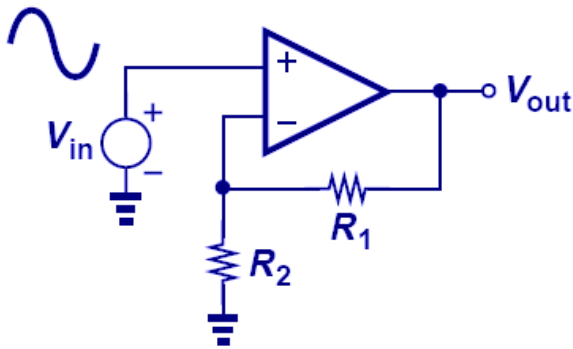
- Vezivanjem NPS oko OP-a (invertujući pojačavač, neinvertujući pojačavač, itd) proširuje se propusni opseg.
- Međutim, takođe se smanjuje pojačanje na niskim učestanostima.

Brzina promjene izlaznog napona (Slew Rate) pojačavača sa OP-om

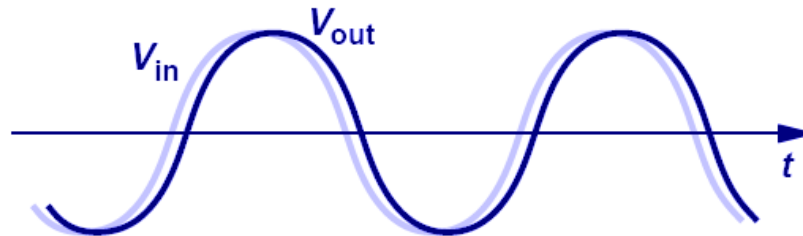


- Slew rate je maksimalna brzina promjene izlaznog napona:
 $SR = |dv_{out}/dt|_{max}$
- Ako je pojačavač bio u zasićenju, imamo i čisto kašnjenje.

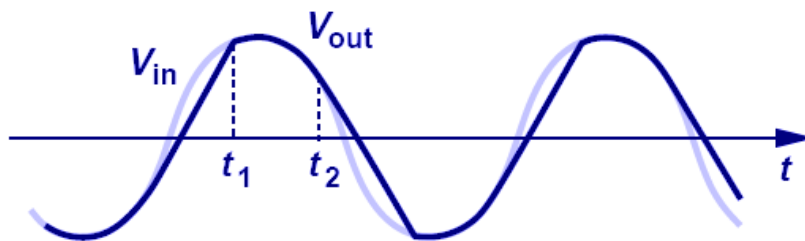
Slew Rate i sinusoidalni signal



(a)



(b)

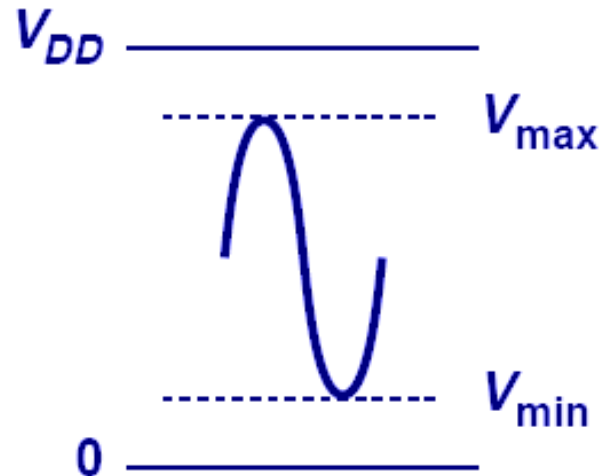
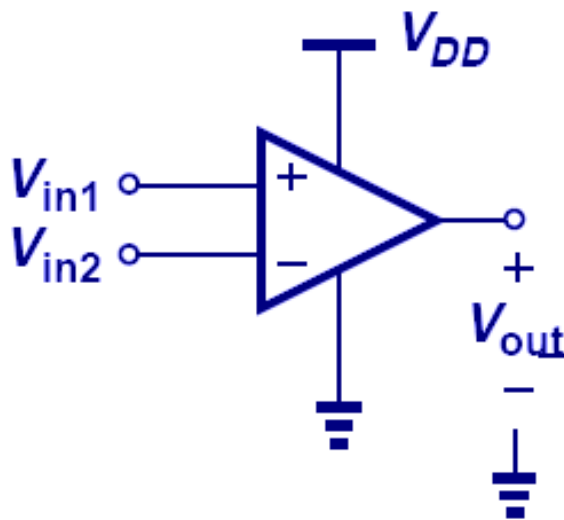


(c)

$$\frac{dV_{out}}{dt} = V_0 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \omega \cos \omega t$$

- Dok je Slew Rate veći od brzine promjene napona na izlazu, izlazni signal prati ulazni.
- Međutim, kako frekvencija i amplituda rastu, Slew Rate postaje nedovoljan i izlazni signal se deformiše.

Granice amplitude izlaznog signala



$$V_{out} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \sin \omega t + \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad \omega_{FP} = \frac{SR}{\frac{V_{max} - V_{min}}{2}}$$

- Da bi se odredila maksimalna frekvencija signala na izlazu, najprije je potrebno odrediti granice amplitude izlaznog signala i podijeliti slew rate sa tim.

Slew Rate

Zadatak:

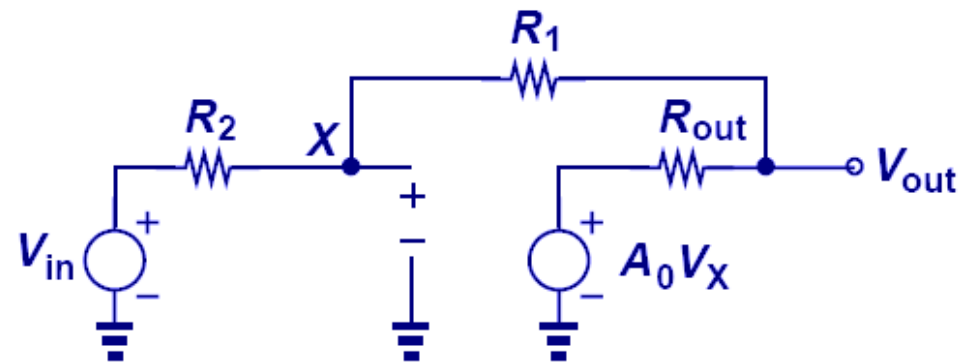
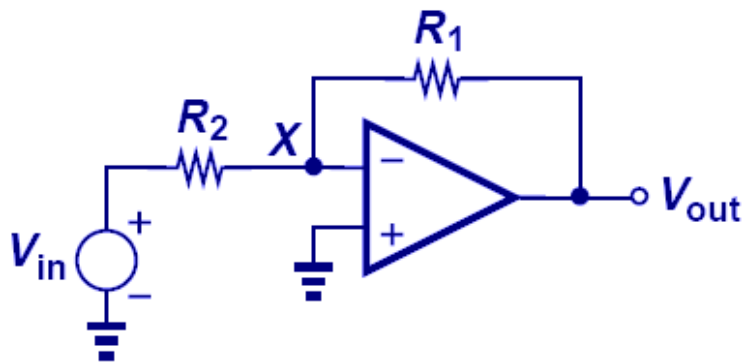


Ako OP ima $SR=0,3V/\mu s$, i treba da radi kao jedinični pojačavač i ulazni sinusoidalni signal ima amplitudu 5V, do koje učestanosti će raditi ispravno?

Ulazna otpornost

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

Nenulta izlazna otpornost



$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = - \frac{R_1}{R_2} \frac{A_0 - \frac{R_{out}}{R_1}}{1 + \frac{R_{out}}{R_2} + A_0 + \frac{R_1}{R_2}}$$

- U praksi, izlazna otpornost OP nije nula.
- Kao što se može vidijeti, izlazna otpornost smanjuje pojačanje.