

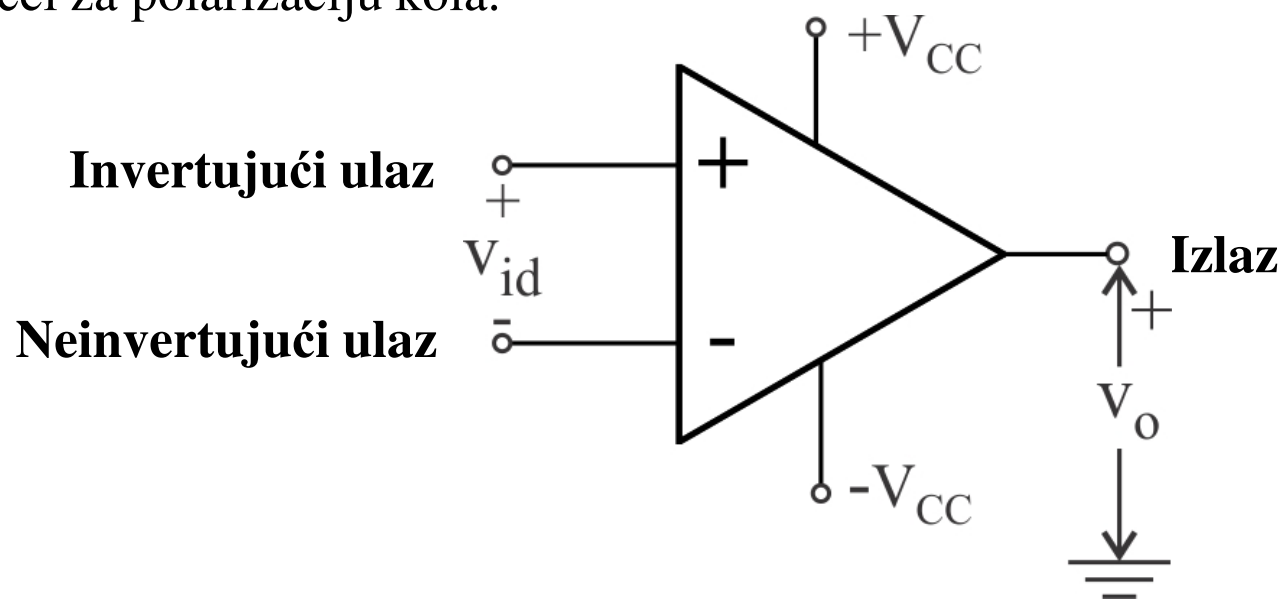
Operacioni pojačavači

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 kola tretirati kao jedna komponenta iako predstavlja 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.

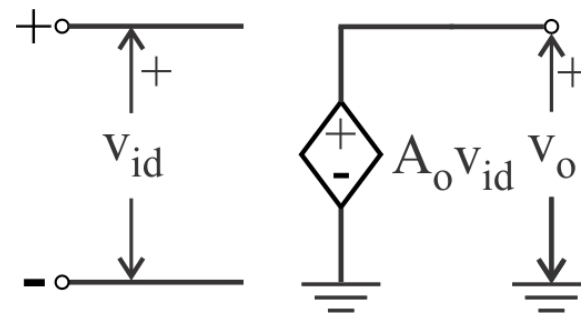
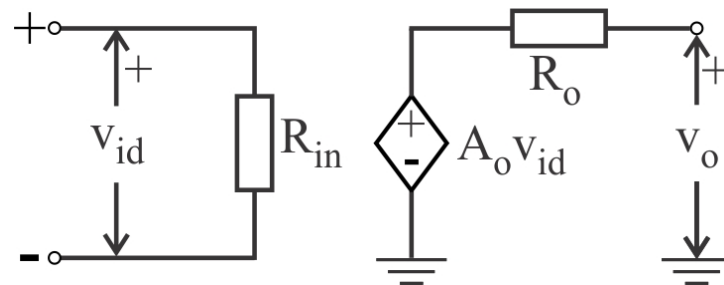
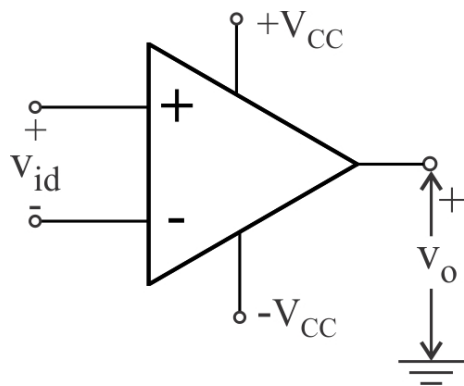
Simbol operacionog pojačavača

- Operacioni pojačavač ima **simetričan ulaz** i **nesimetričan izlaz**. To znači da se izlazni napon, v_o , meri između 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. Znak minus na ulazu označava da je izlazni napon fazno pomeren u odnosu na ulazni za 180° .
- Ponekad se pored dva ulazna priključka i izlaznog priključka prikazuju i priključci za polarizaciju kola.



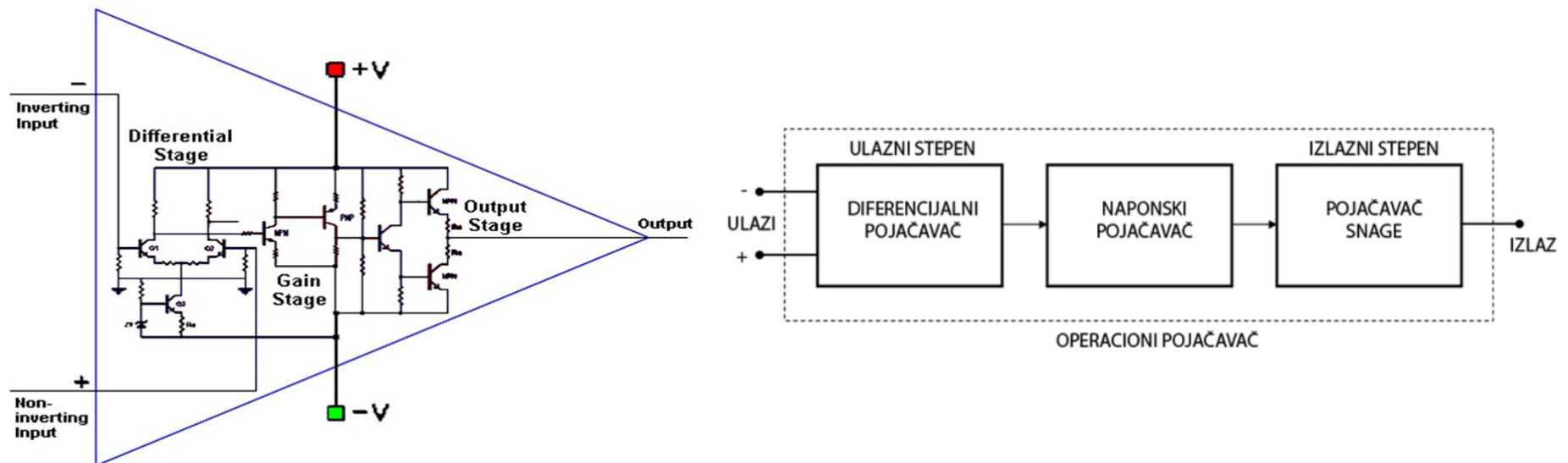
Model (ekvivalentno kolo) operacionog pojačavača

- Idealni operacioni pojačavač ima beskonačnu ulaznu otpornost R_{in} , nultu izlaznu otpornost R_o , kao i 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 .

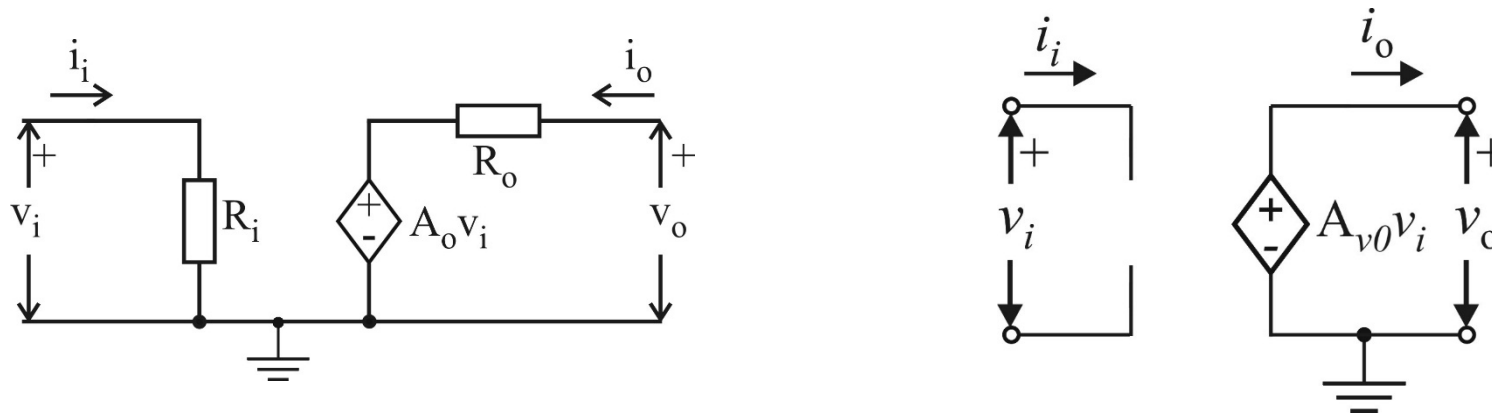


Struktura operacionog pojačavača

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



Operacioni pojačavač po karakteristikama odgovara idealnom naponskom pojačavaču sa simetričnim ulaznom

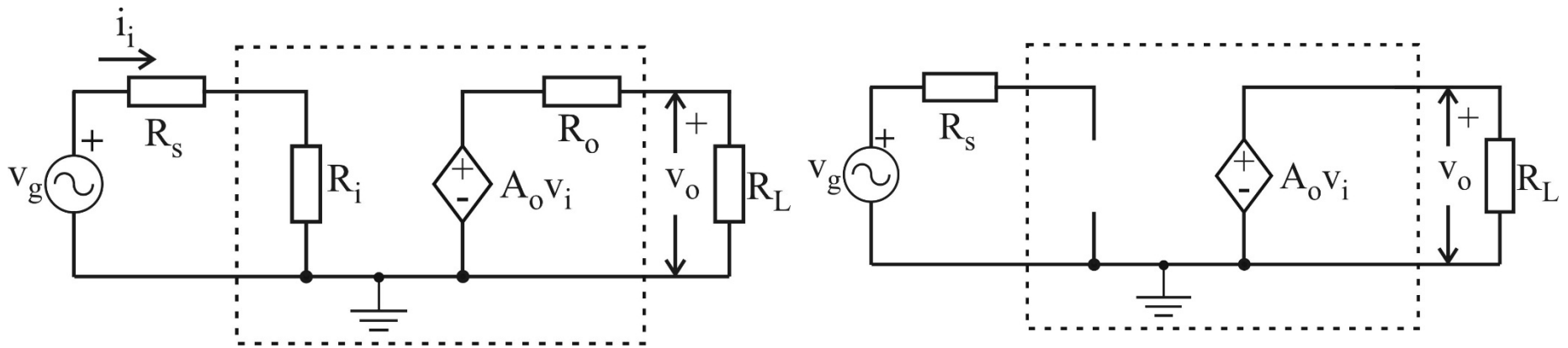


Idealni naponski pojačavač ima beskonačno veliku ulaznu otpornost i nultu izlaznu otpornost. Na taj način dobija se maksimalna vrednost naponskog pojačanja, jer nema smanjenja napona ni na ulaznom ni na izlaznom pristupu.

$$R_i = \infty \quad R_o = 0$$

Idealni operacioni pojačavač

Operacioni pojačavač po karakteristikama odgovara idealnom naponskom pojačavaču sa simetričnim ulazom



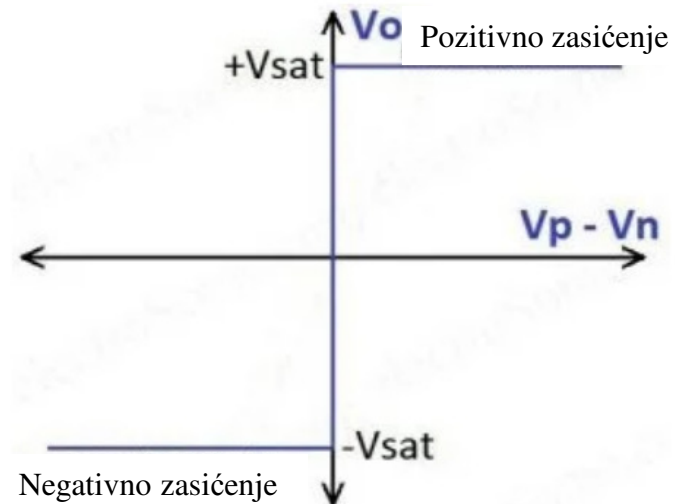
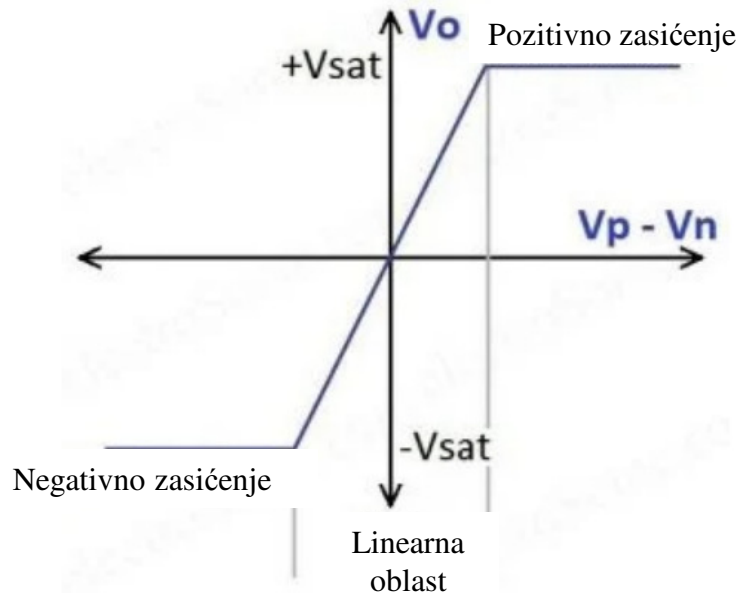
$$A_n = \frac{v_o}{v_g} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot A_o \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

$$R_i = \infty \quad R_o = \mathbf{0}$$
$$A_n = \frac{v_o}{v_g} = A_o$$

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

Idealni operacioni pojačavač

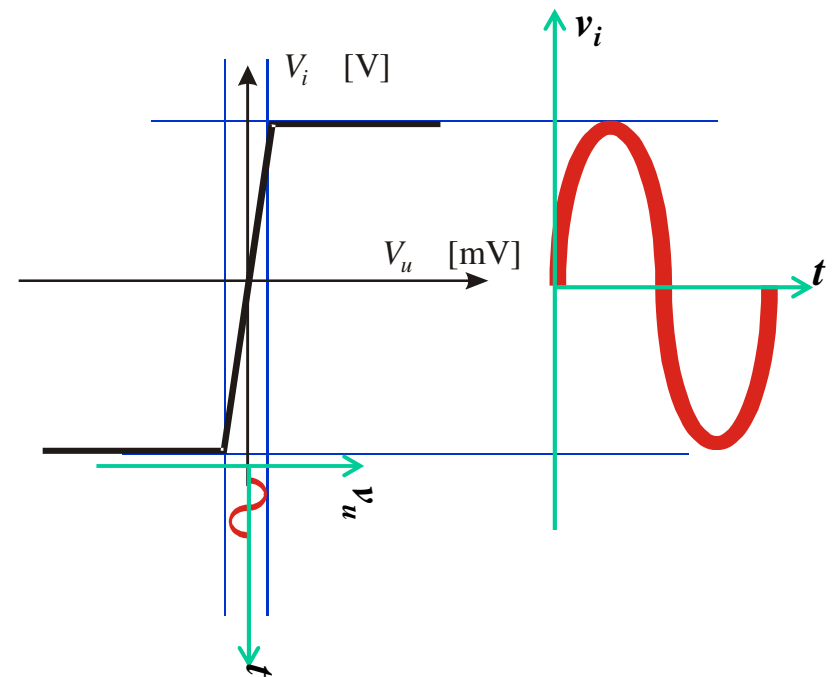
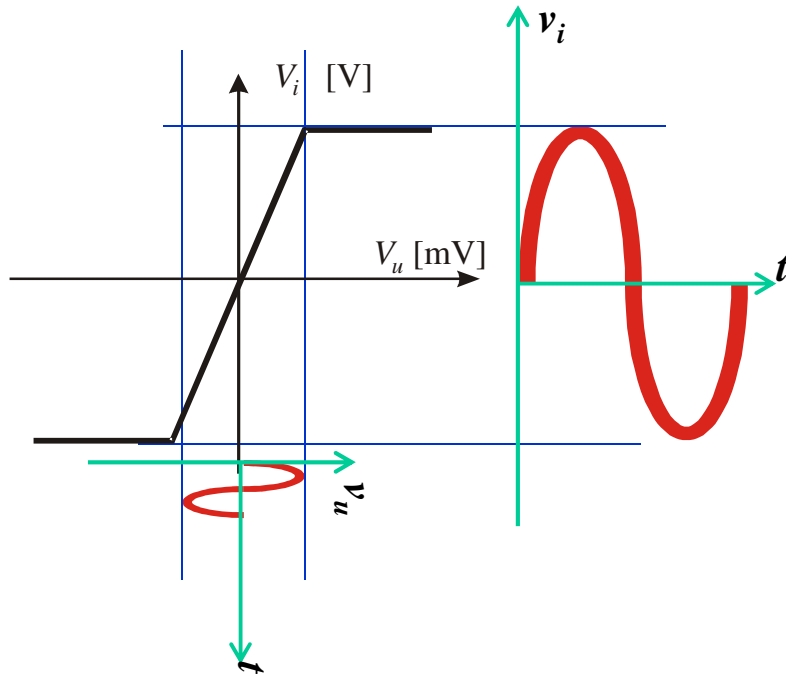
Prenosna karakteristika



U prenosnoj karakteristici operacionog pojačavača se mogu uočiti tri linearna segmenta: negativno zasićenje, pozitivno zasićenje i linearna oblast. Linearna oblast kod realnog operacionog pojačavača je veoma uzana i odgovara ulaznom diferencijalnom naponu koji je reda mikrovolta.

Idealni operacioni pojačavač

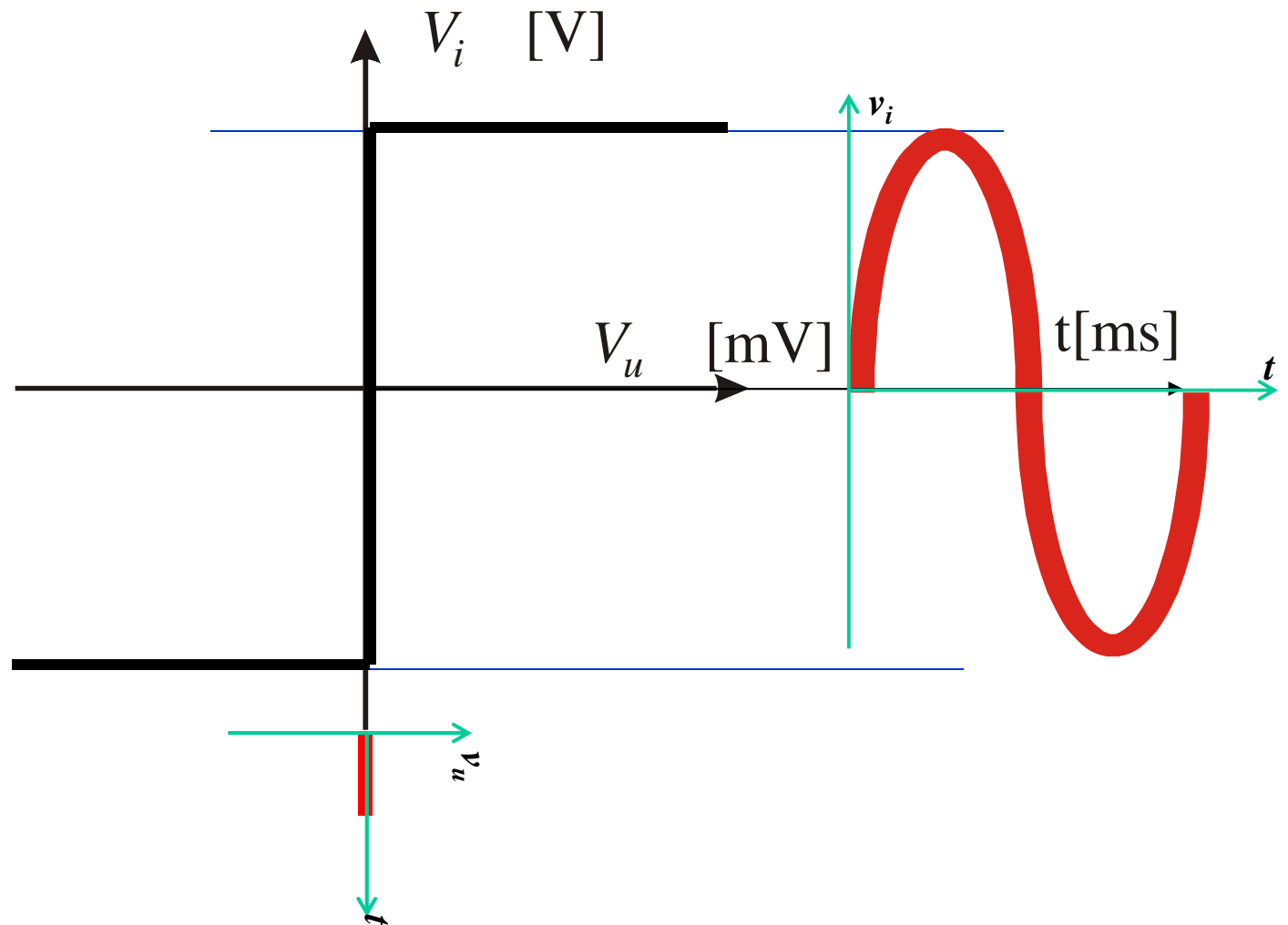
Prenosna karakteristika



Što je pojačanje veće nagib prenosne karakteristike u linearnoj oblasti je veći.

Idealni operacioni pojačavač

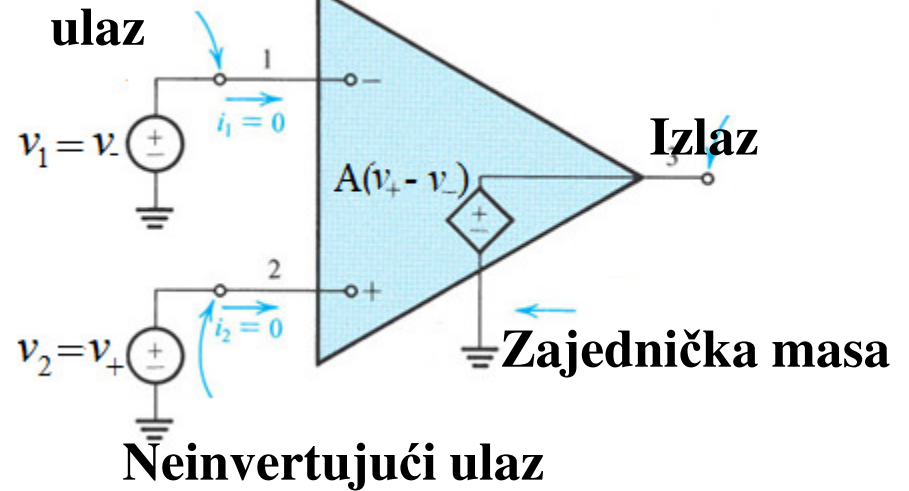
Prenosna karakteristika idealnog operacionog pojačavača



Idealni operacioni pojačavač

**Idealni operacioni
pojačavač ima
beskonačnu vrednost
naponskog pojačanja**

Invertujući



$$A = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \quad \xrightarrow{\quad} \quad v_+ - v_- = \frac{v_i}{A} = 0 \quad \xrightarrow{\quad} \quad \boxed{v_+ = v_-}$$

$A \rightarrow \infty$

Kada se operacioni pojačavač primenjuje u linearnim kolima uvek postoji negativna povratna sprega kojom se signal vraća sa izlaza na ulaz. Zahvaljujući vraćanju signala sa izlaza na ulaz uspostavlja se vrlo mala vrednost napona između ulaznih priključaka (kada bi A bilo beskonačno nulta vrednost napona između ulaza).

Idealni operacioni pojačavač

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 je idealnog operacionog pojačavača je nula:

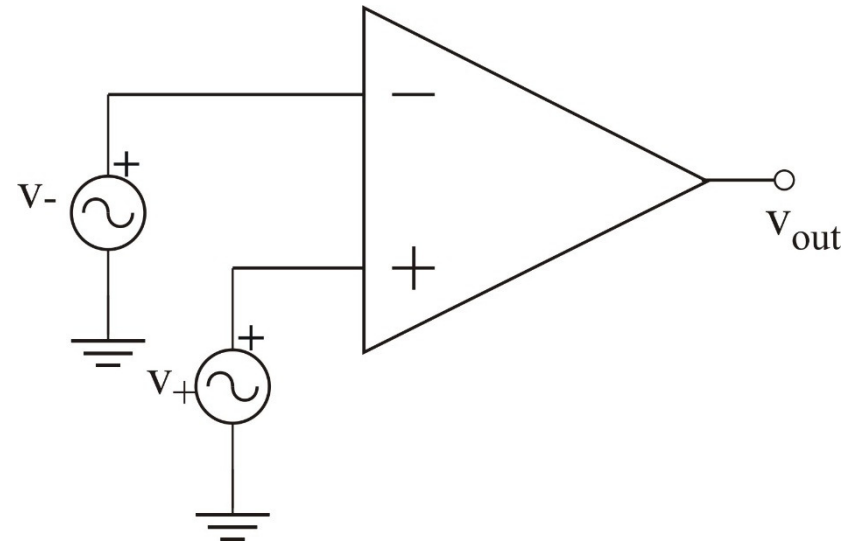
$$A = A_{cm} = \frac{v_{out}}{v_{ucm}} = \frac{v_{out}}{\frac{1}{2}(v_+ + v_-)} = 0,$$

a razlika signala mora maksimalno da se pojača

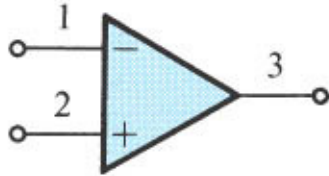
$$A_d = \frac{v_{out}}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad v_+ - v_- = 0 \quad v_+ = v_-$$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR (mera kvaliteta pojačavača)

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

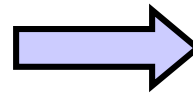


Idealni operacioni pojačavač



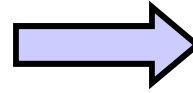
Idealni operacioni pojačavač karakterišu:

**beskonačno pojačanje
razlike ulaznih signala**



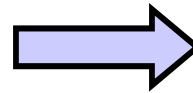
$$v_i = v_d = v_+ - v_- = 0$$
$$v_+ = v_-$$

beskonačna ulazna otpornost



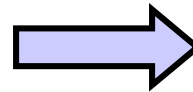
$$i_i = 0, v_i \neq f(R_g)$$

izlazna otpornost jednaka nuli



$$v_o \neq f(R_p)$$

ne pojačava srednju vrednost



$$A_{cm} = 0$$

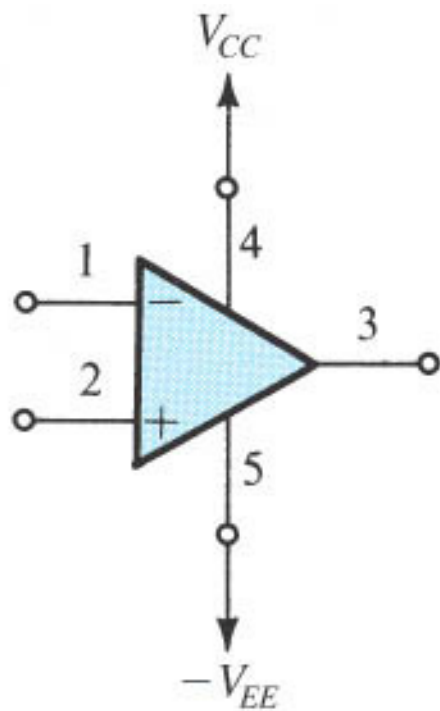
beskonačni propusni opseg



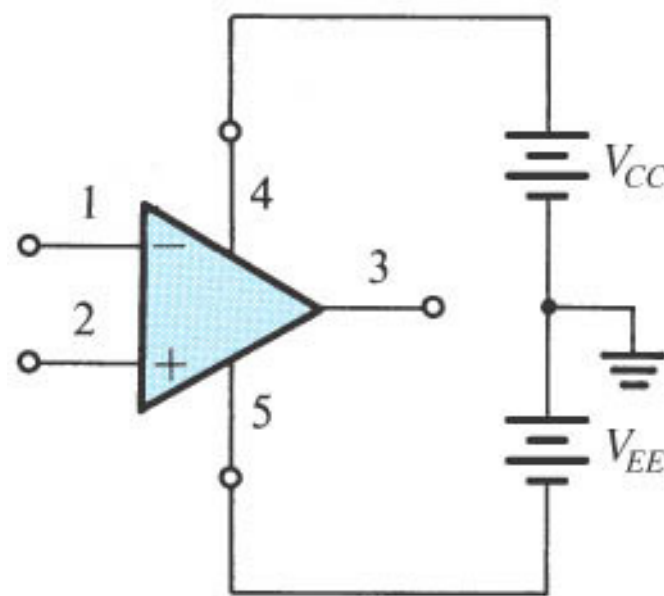
idealne f k-ke

Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



(a)

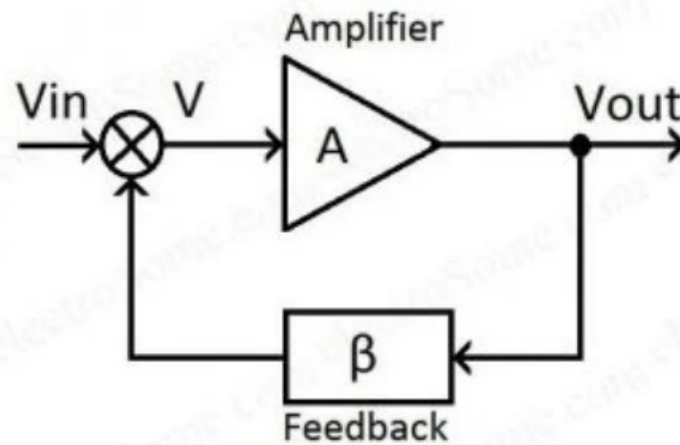


(b)

Idealni operacioni pojačavač

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

Zato se pojačanje *OpAmpa* (o kome smo do sada govorili) naziva *pojačanje u otvorenoj petlji (Open loop gain)* a pojačanje kola sa povratnom spregom (*Closed loop gain*).



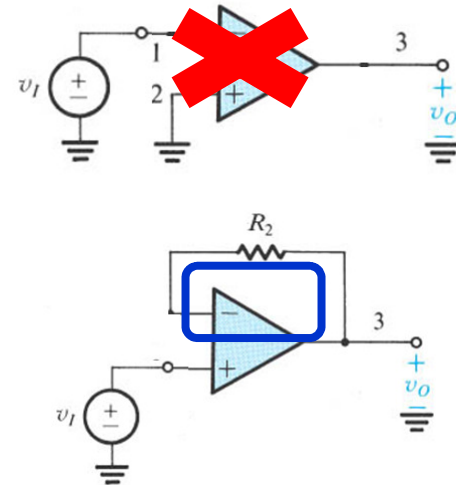
Idealni operacioni pojačavač

Prieri primene OpAmp-a

Nikada se ne koristi bez drugih elemenata u kolu – preko kojih se ostvaruje *povratna sprega*

Mora da postoji bar još jedna komponenta između izlaza i ulaza operacionog pojačavača.

Sprega između izlaza i ulaza čini „zatvorenu petlju“ – *closed loop*

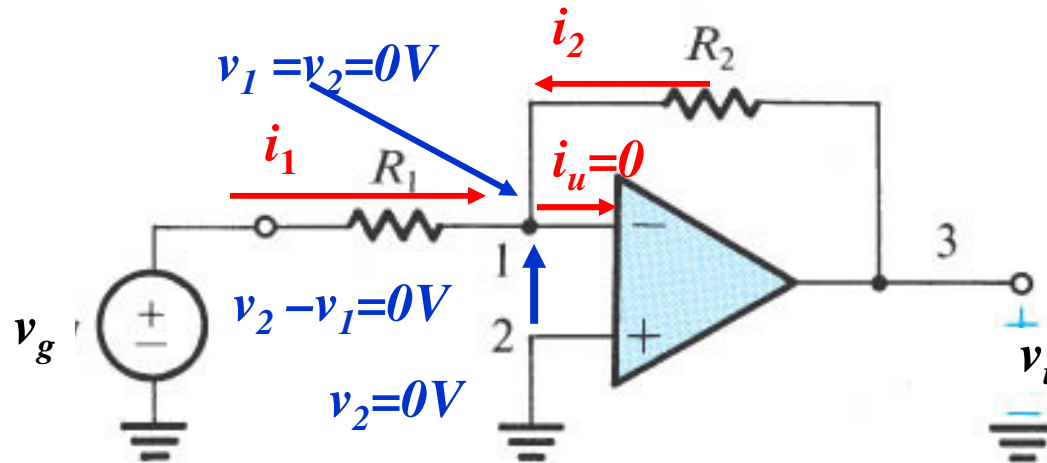


Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

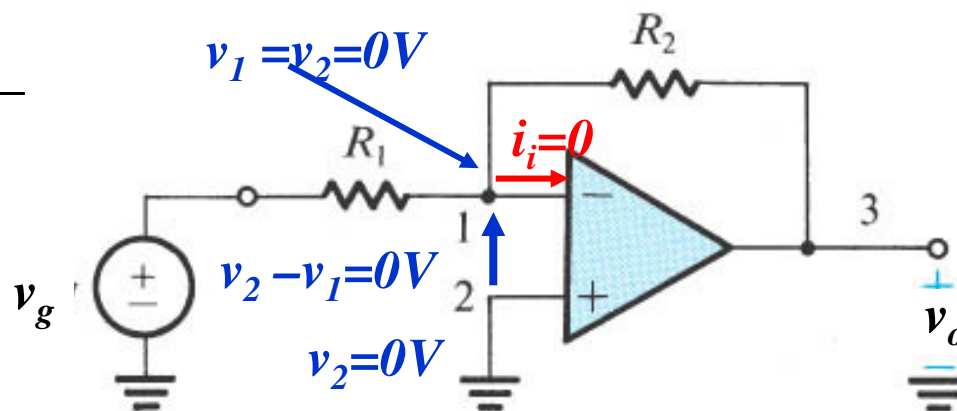
izlazni signal suprotne faze od ulaznog

Koliko je pojačanje u zatvorenoj petlji $A=v_i/v_g$?



Invertorski pojačavač

Čvor 1 je **virtuelna masa**. To znači da je na potencijalu mase a nije povezan sa masom. Prilikom analize kola mora se napisati jednačina i za taj čvor.



$$v_2 - v_1 = 0V \Rightarrow v_1 = 0$$

$$i_i = 0A$$

$$\frac{v_1 - v_g}{R_1} + \frac{v_1 - v_o}{R_1} = 0$$

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

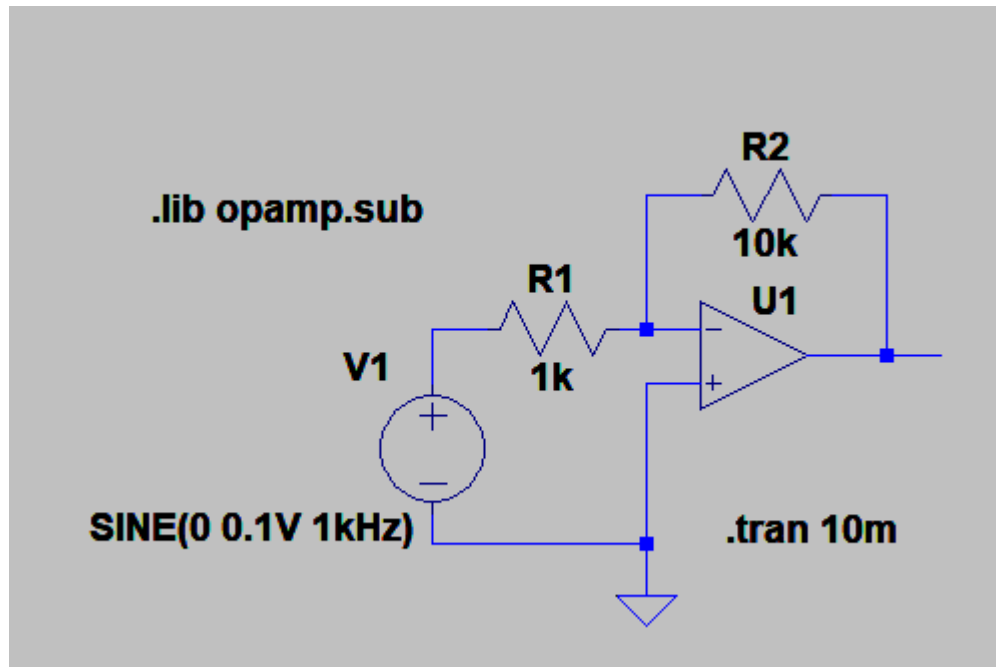
$$\Rightarrow v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_g$$

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

Operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

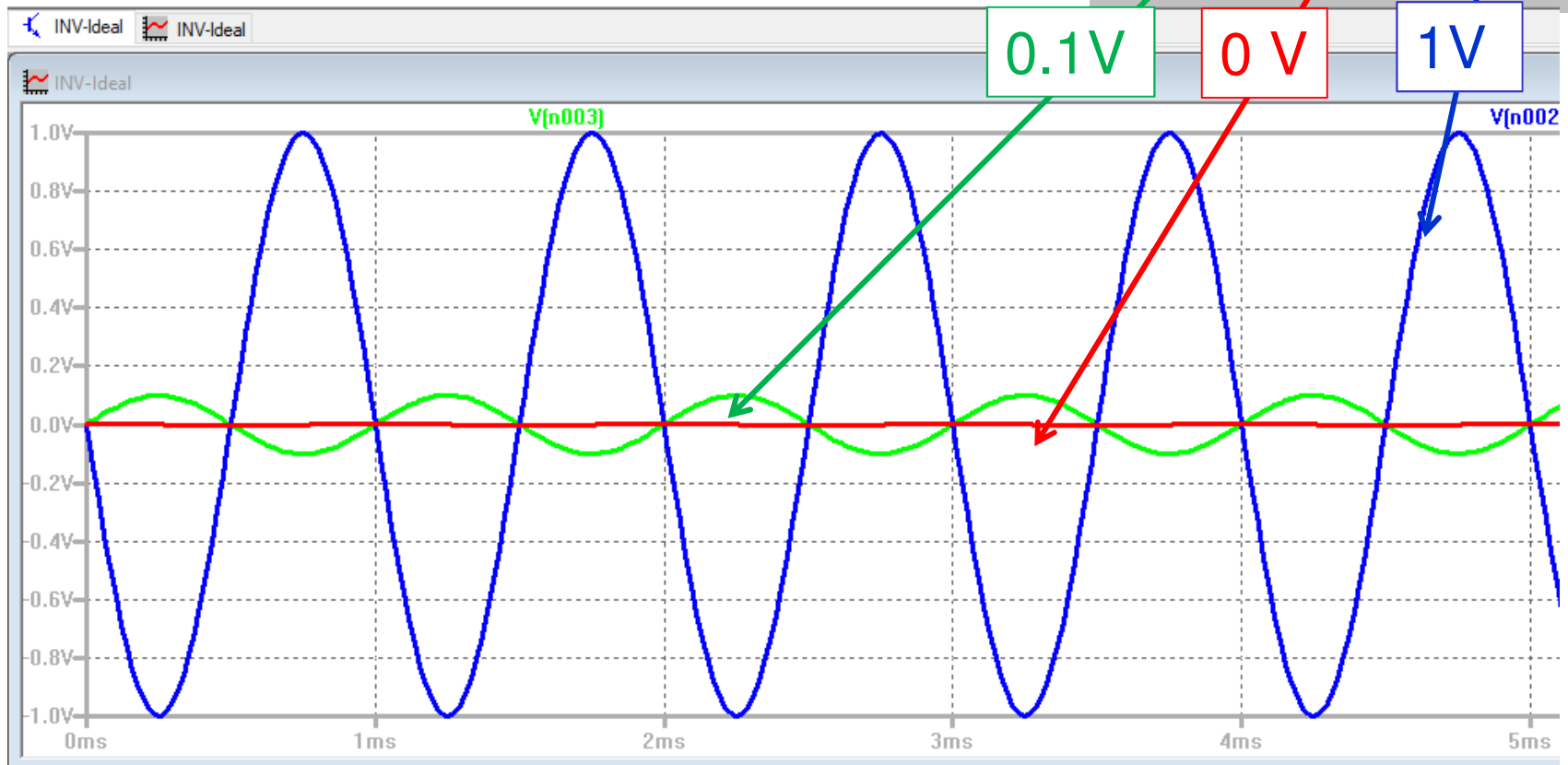
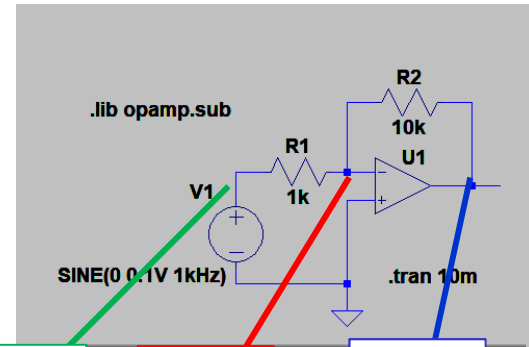
$$A = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$



Operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

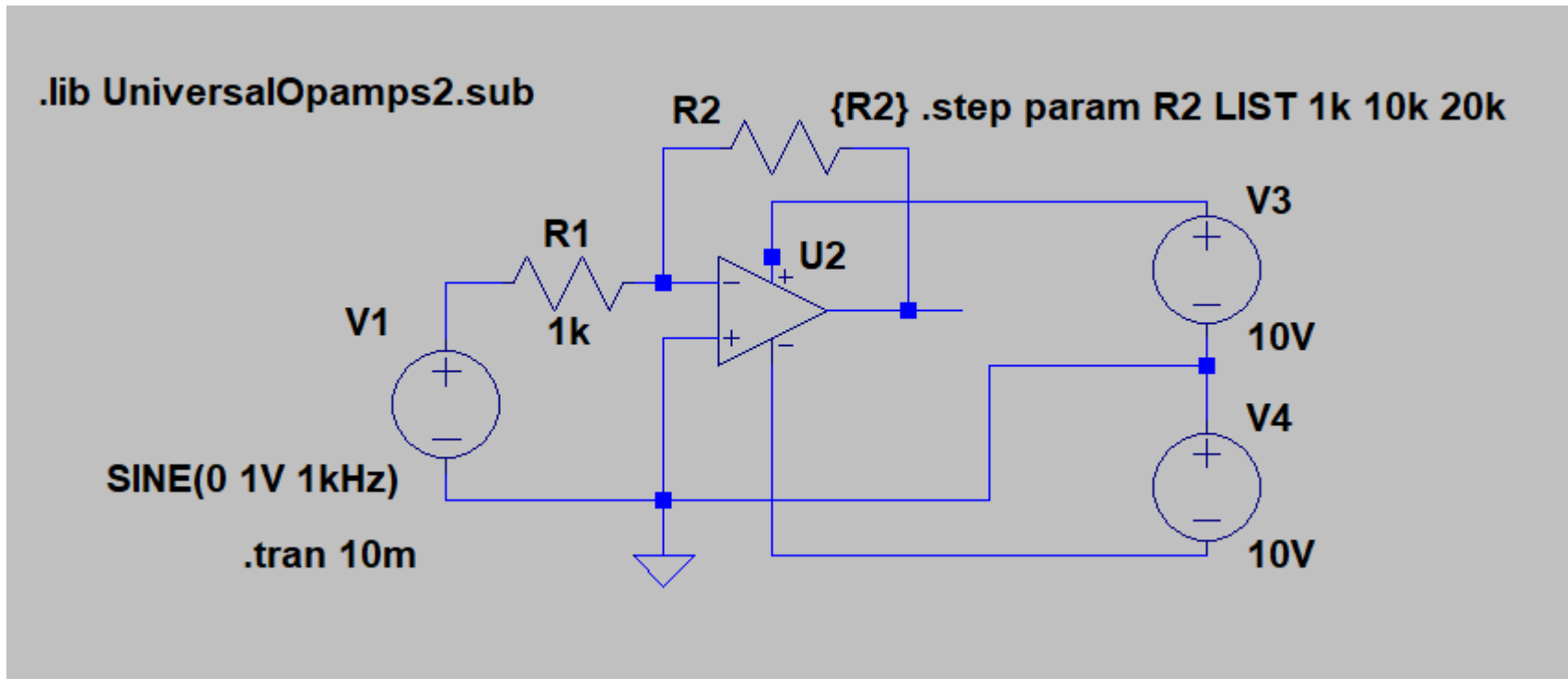
$$A = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$



Operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

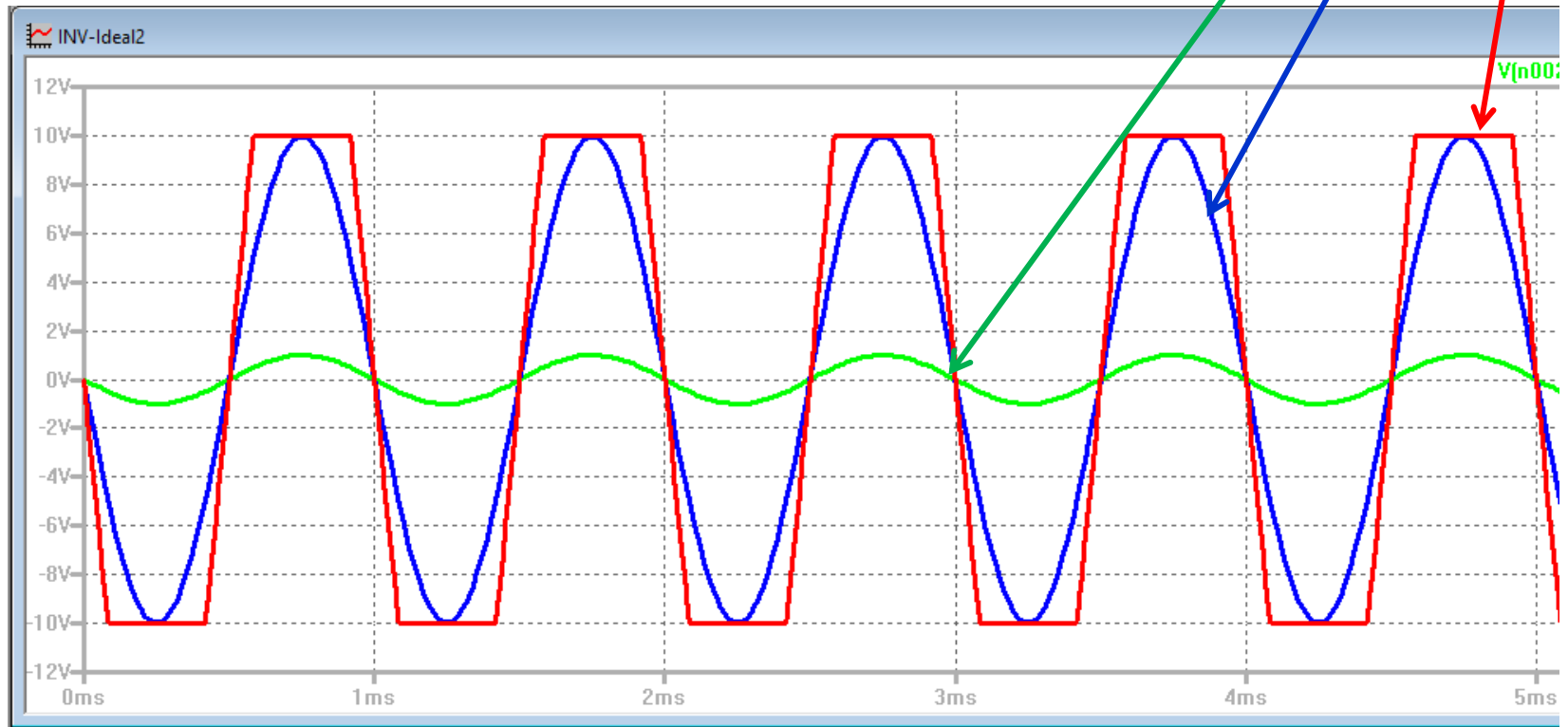
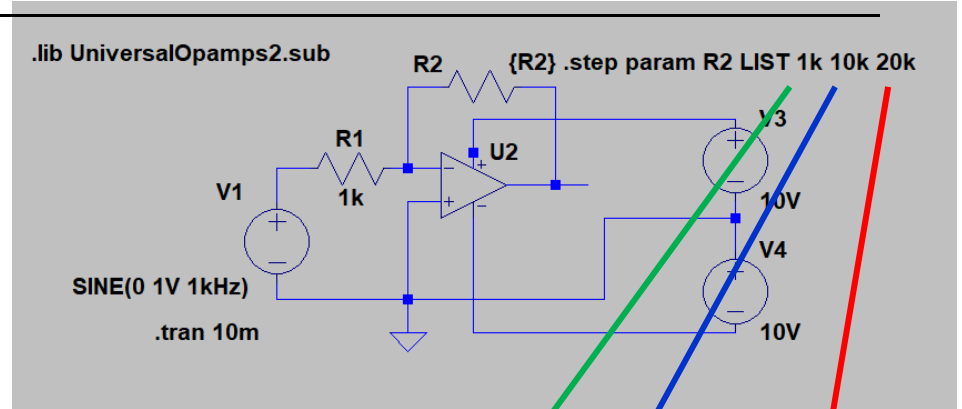
$$A = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$



Operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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



Operacioni pojačavač

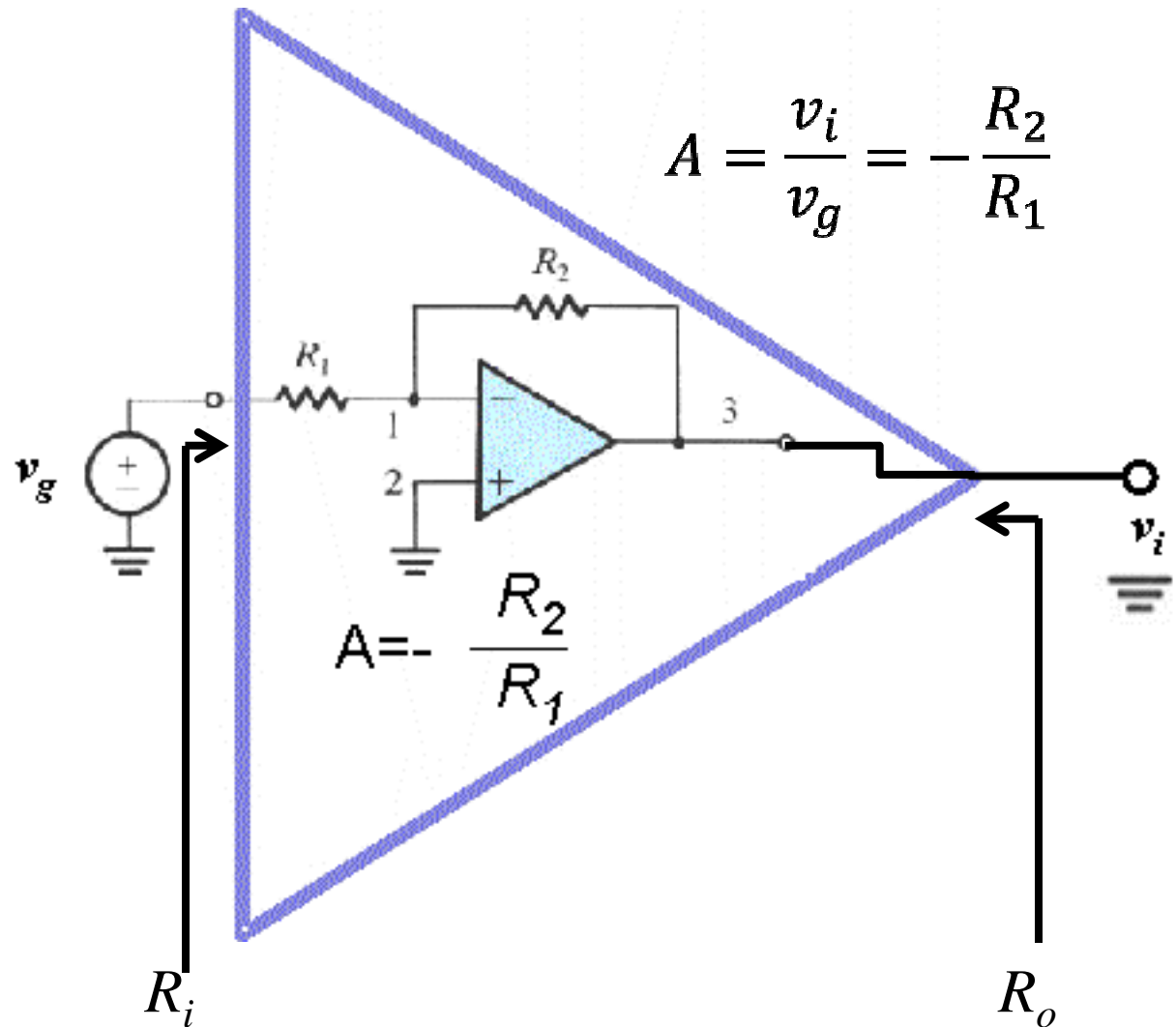
Invertorski pojačavač

osobine

Naponsko pojačanje

Ulazna otpornost

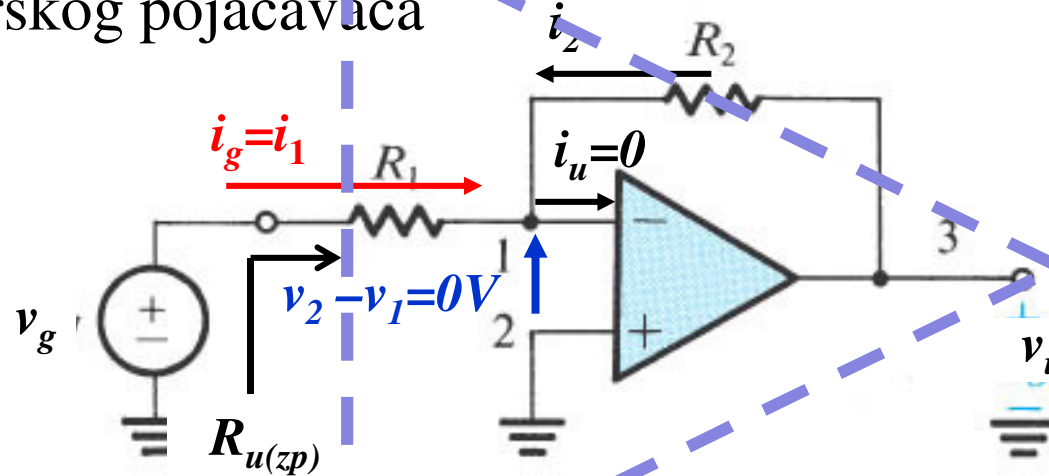
Izlazna otpornost



Operacioni pojačavač

Ulazna otpornost invertorskog pojačavača

$$R_{i(CL)} = \frac{v_g}{i_g} = ?$$

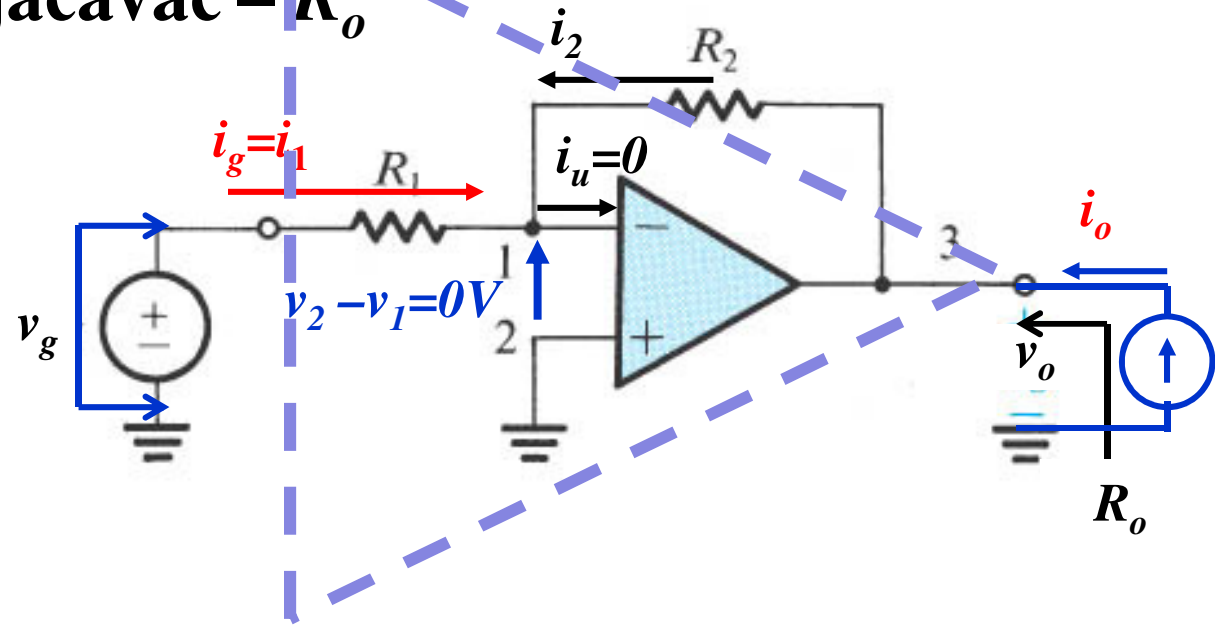


$$\left. \begin{array}{l} v_1 = 0 \\ i_g = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1} \end{array} \right\} \Rightarrow R_{i(zp)} = \frac{v_g}{i_g} = R_1$$

Ako se zahteva velika vrednost ulazne otpornosti $R_{i(CL)}$, 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 ($A = -R_2/R_1$).

Operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – R_o



$$R_o = R_o \parallel R_2 \approx R_o \approx 0\Omega$$

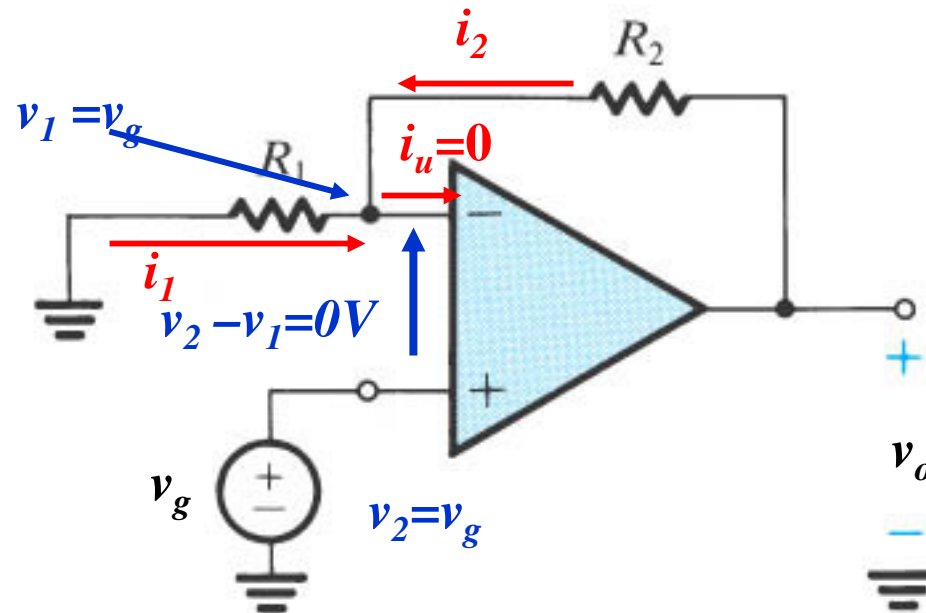
Kod realnih OpAmp, izlazana otpornost pojačavača (u zatvorenoj petlji) manje od sopstvene izlazne otpornosti OpAmpa (u otvorenoj petlji)!!!

Operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač –

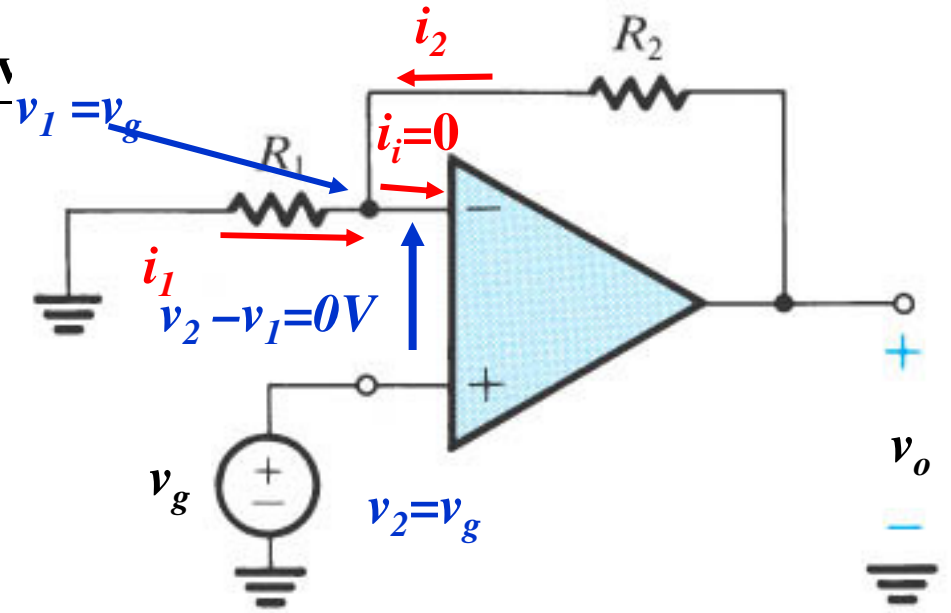
izlazni signal je u fazi sa *ulaznim*

Koliko je pojačanje u zatvorenoj petlji $A=v_o/v_g$?



Operacioni pojačav

Neinvertorski pojačavač



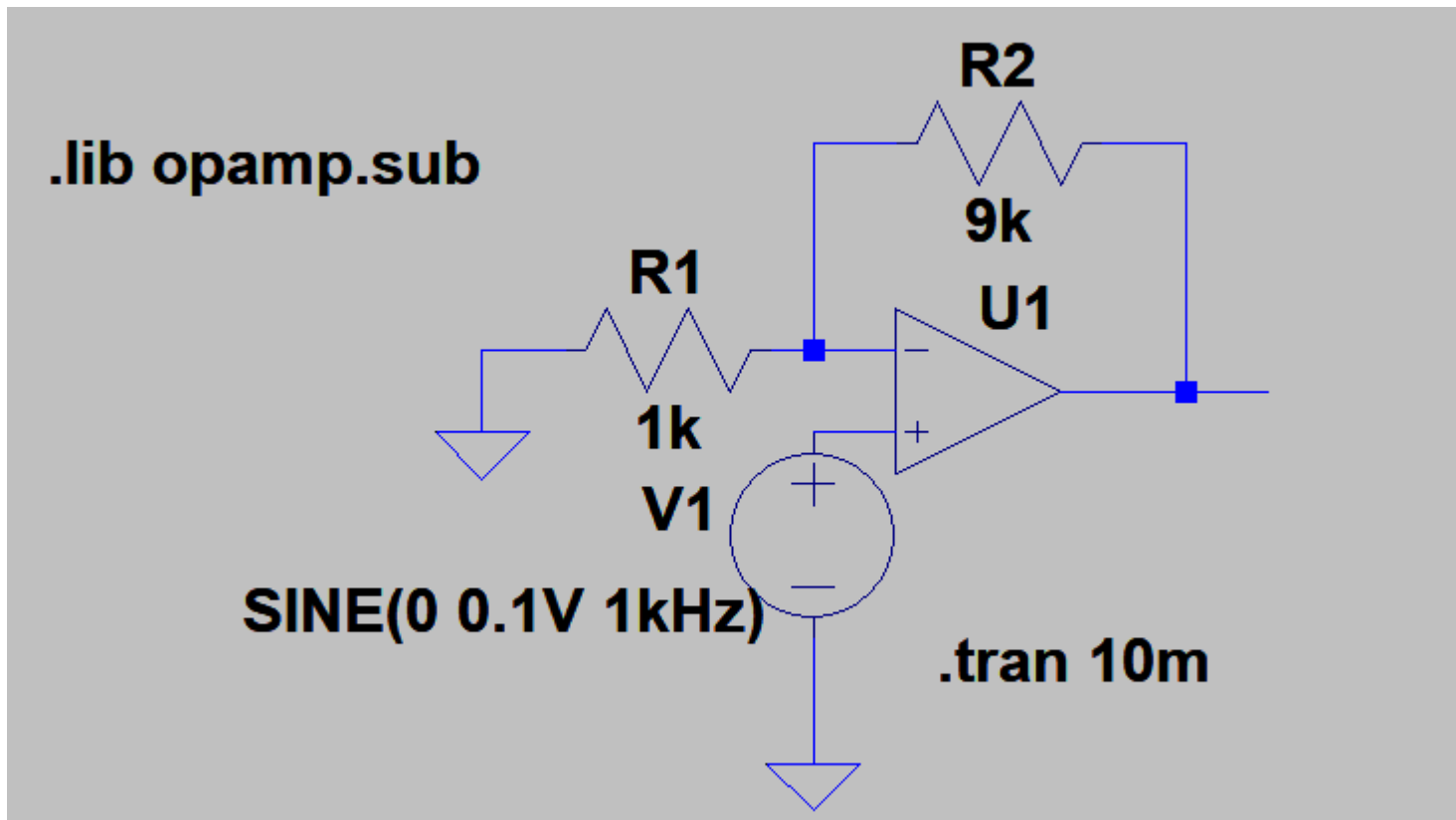
$$\left. \begin{array}{l} v_1 = v_2 = v_g \\ i_i = 0 \\ \frac{v_2}{R_1} + \frac{v_2 - v_o}{R_2} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{v_o - v_g}{R_2} = \frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_g$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

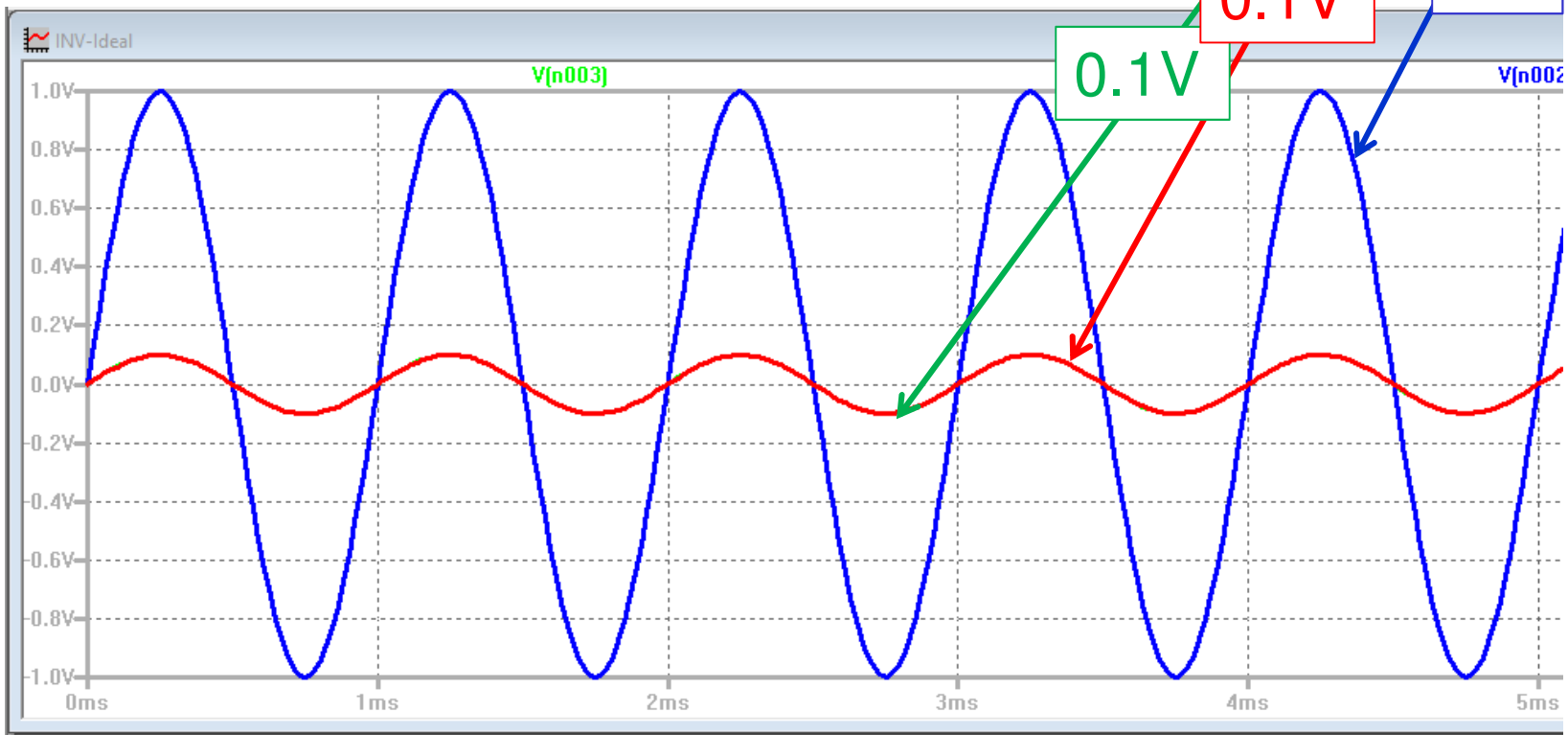
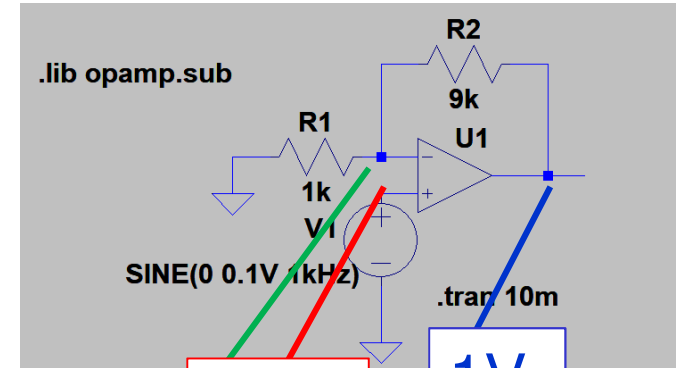
$$A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

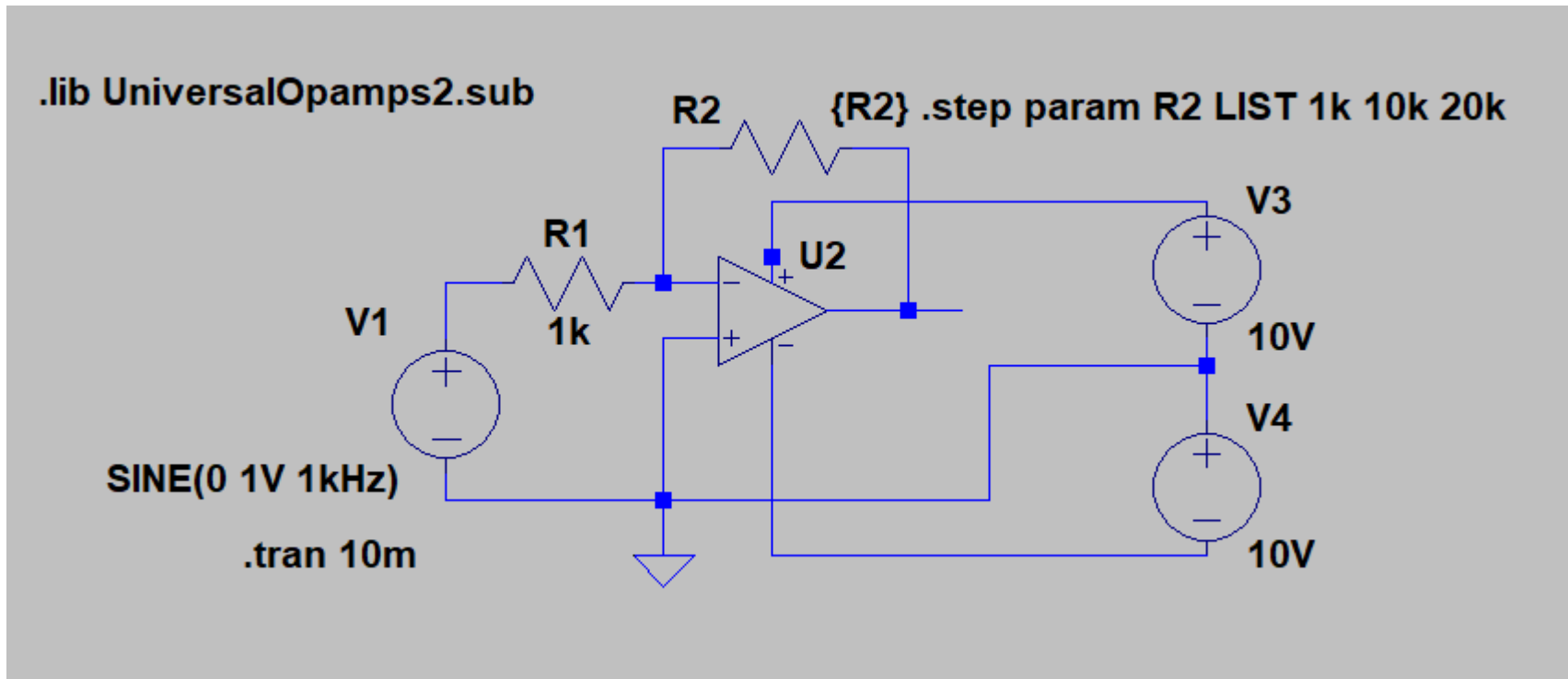
$$A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

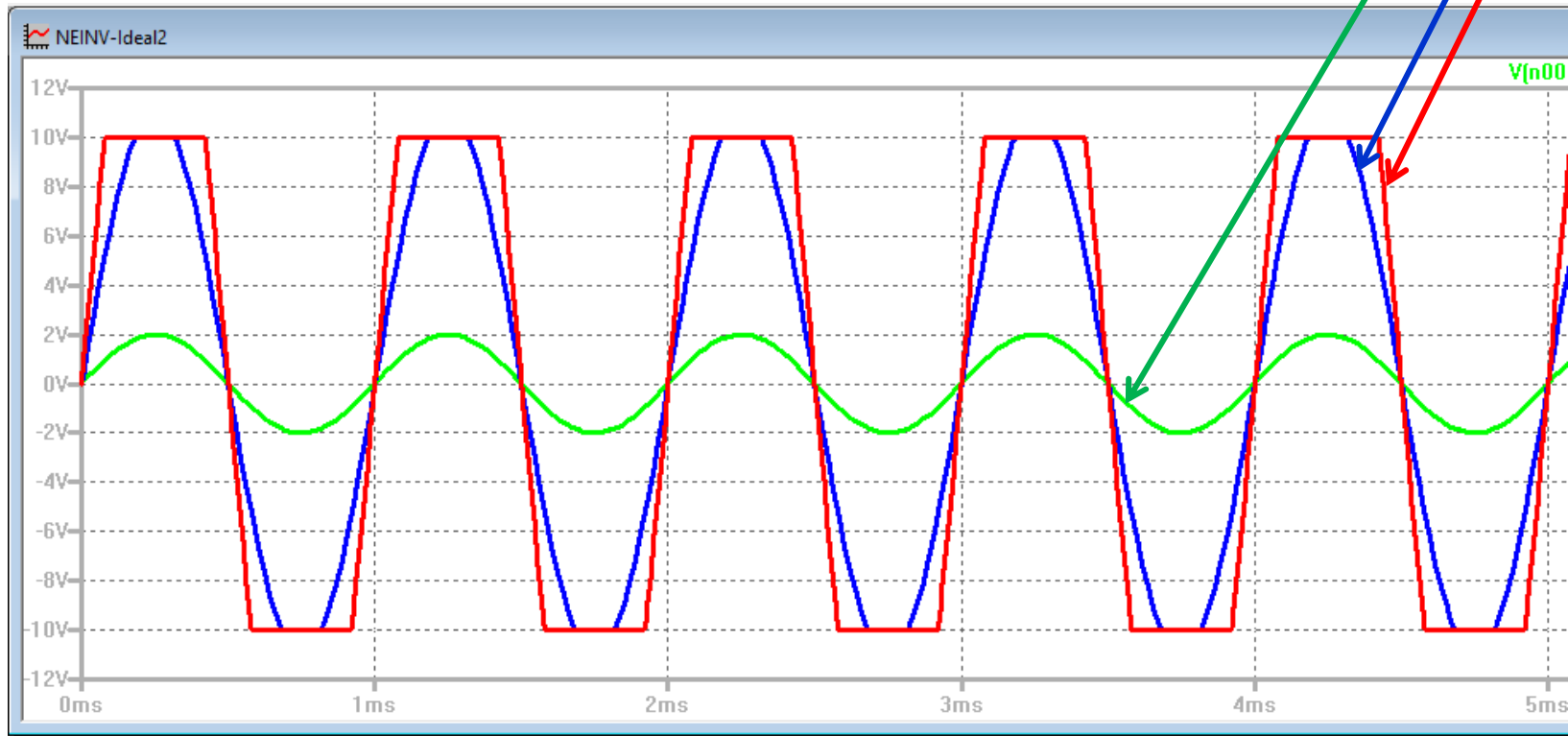
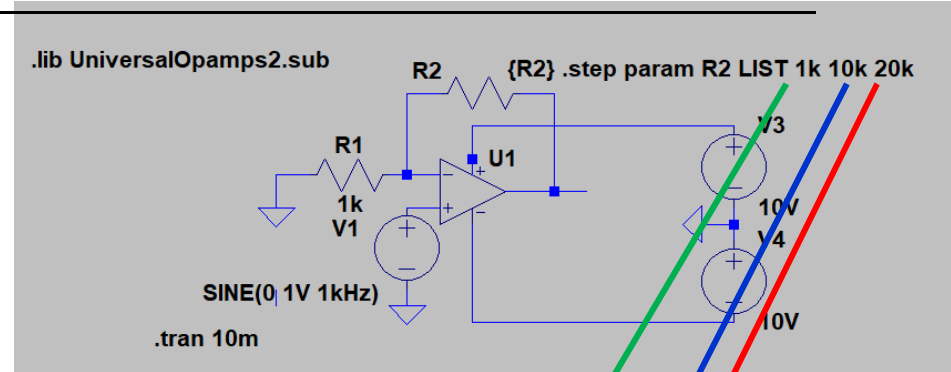
$$A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

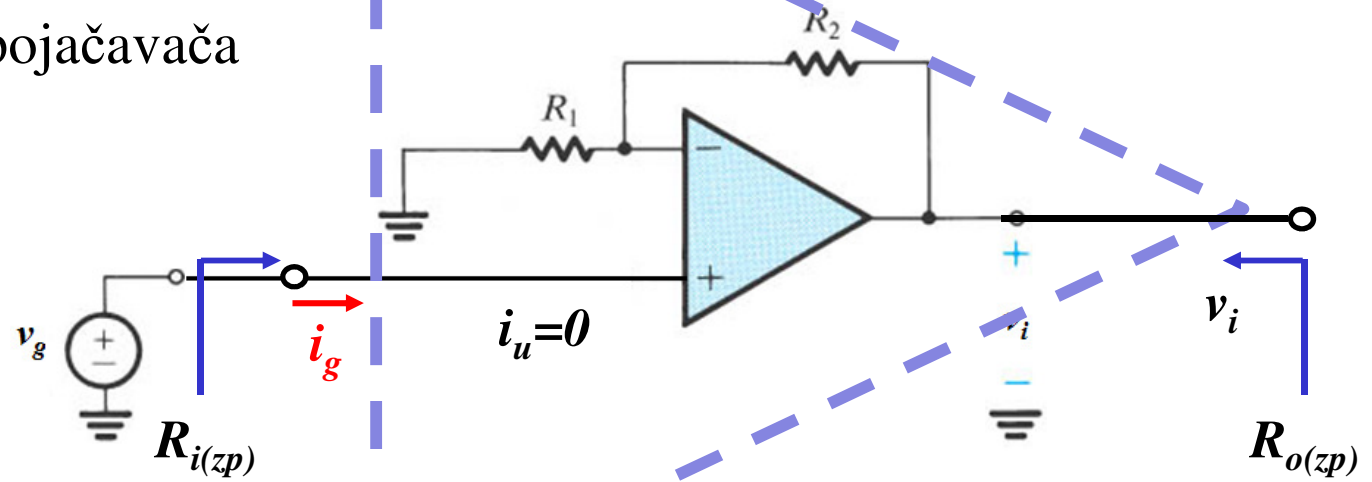
$$A = \frac{v_o}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Idealni operacioni pojačavač

Ulazna i izlazna otpornost

Neinvertorskog pojačavača



$$i_g = i_u = 0$$

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

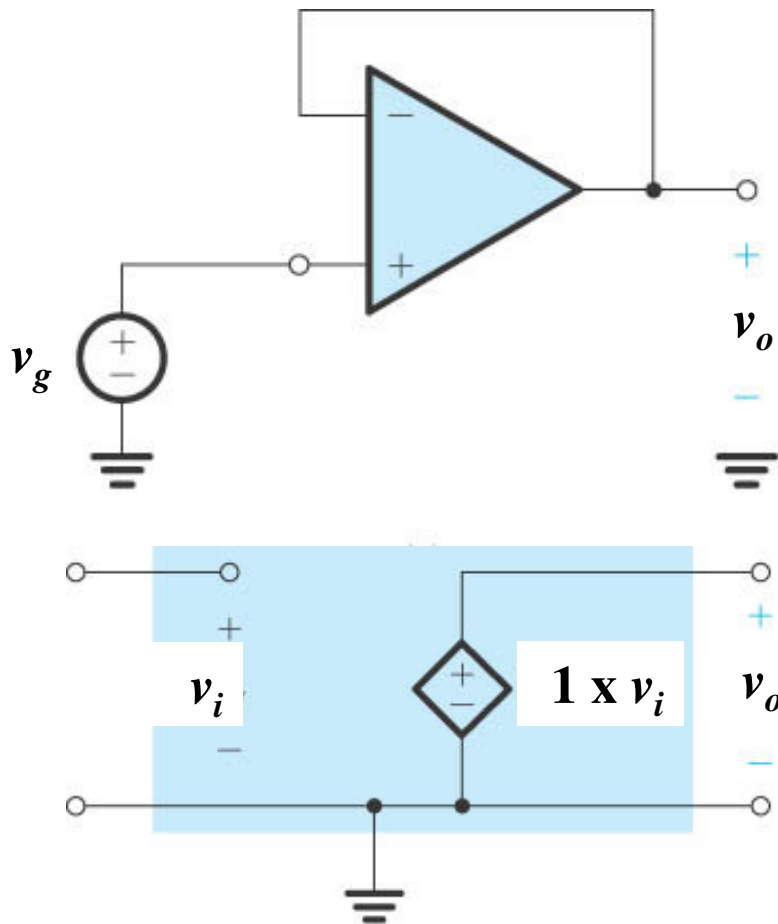
$$R_o = R_o || R_2 \approx R_o \approx 0 \Omega$$

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

operacioni pojačavač

Naponski bafer

Naponski bafer je pojačavač čija je uloga da vrednost signala 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.

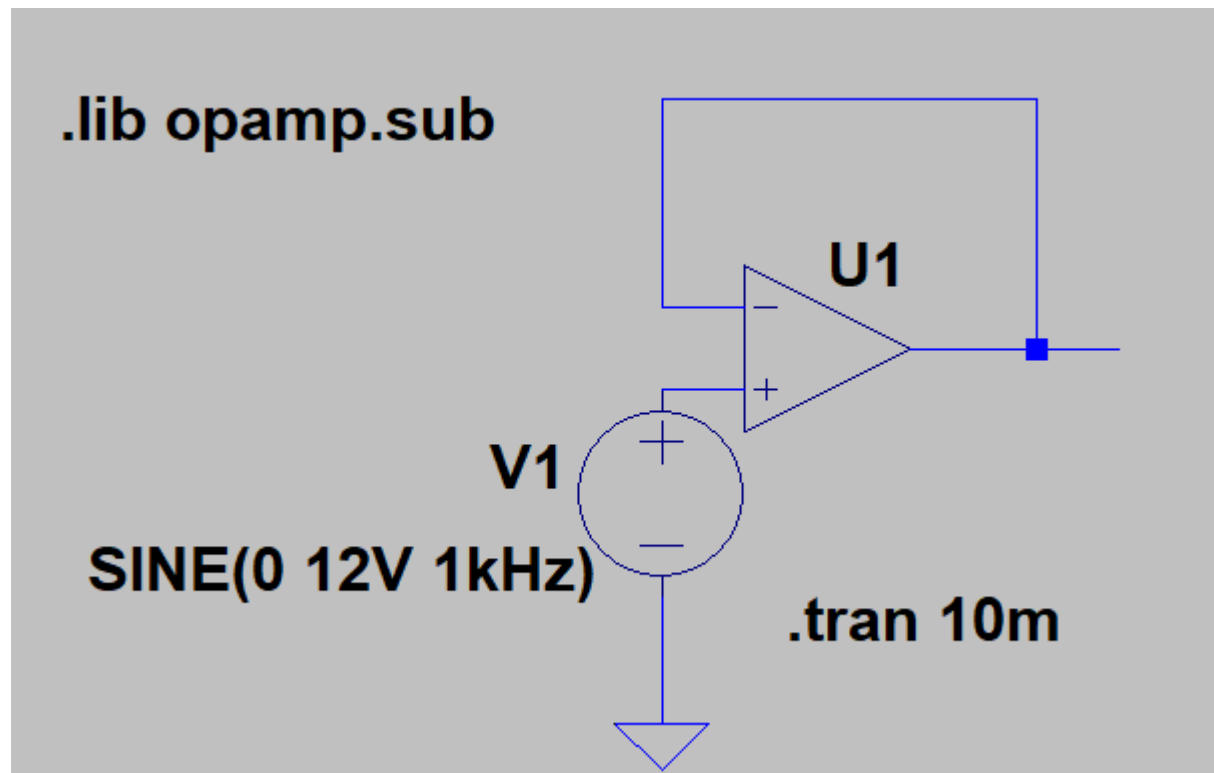
Naponski bafer se veoma jednostavno realizuje naponskim pojačavačem tako što se povežu invertujući ulaz i izlaz. Ulaz bafera je na neinvertujućem ulazu.

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

$$A_{(CL)} = 1 \quad R_{i(CL)} \rightarrow \infty$$

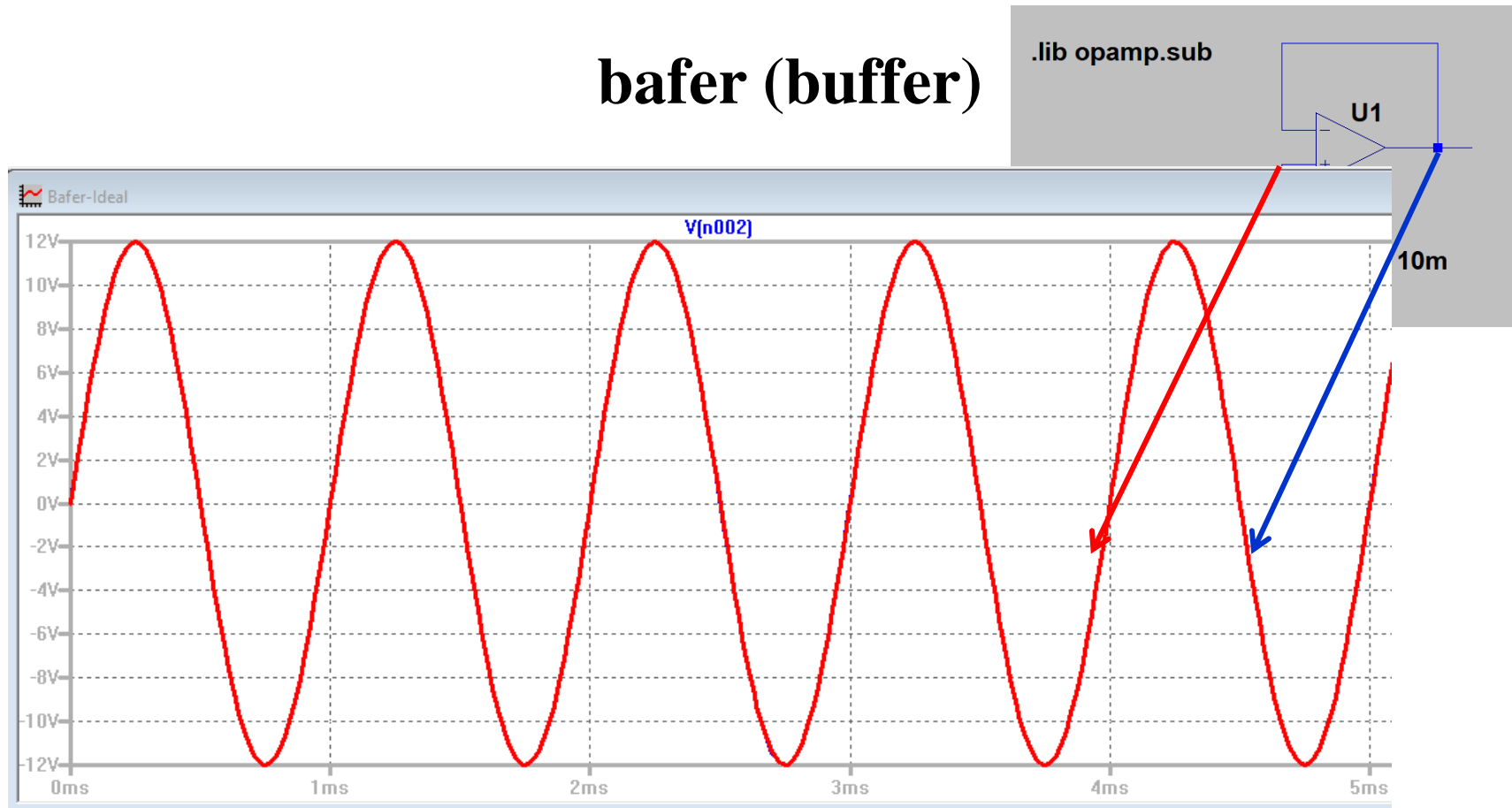
$$R_{o(CL)} = 0$$

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



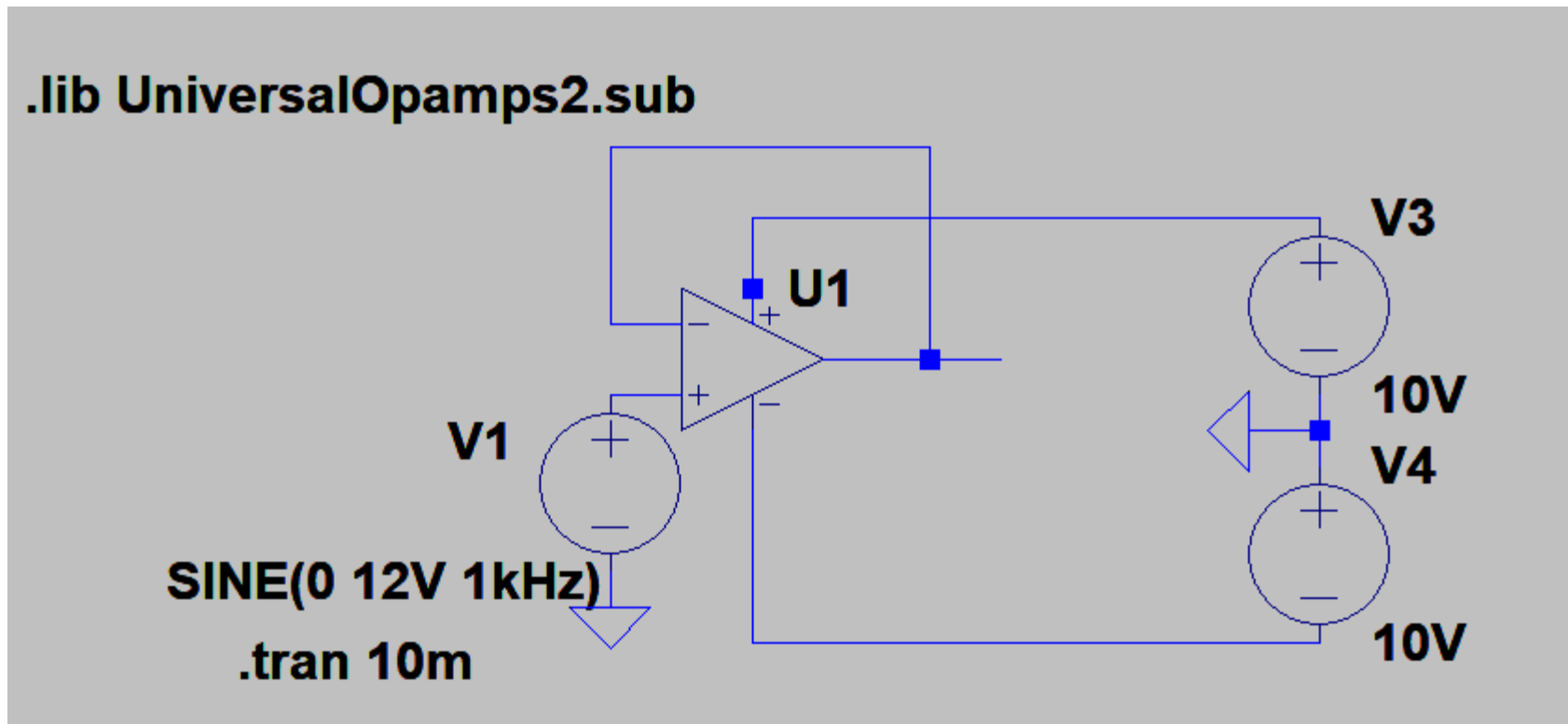
operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



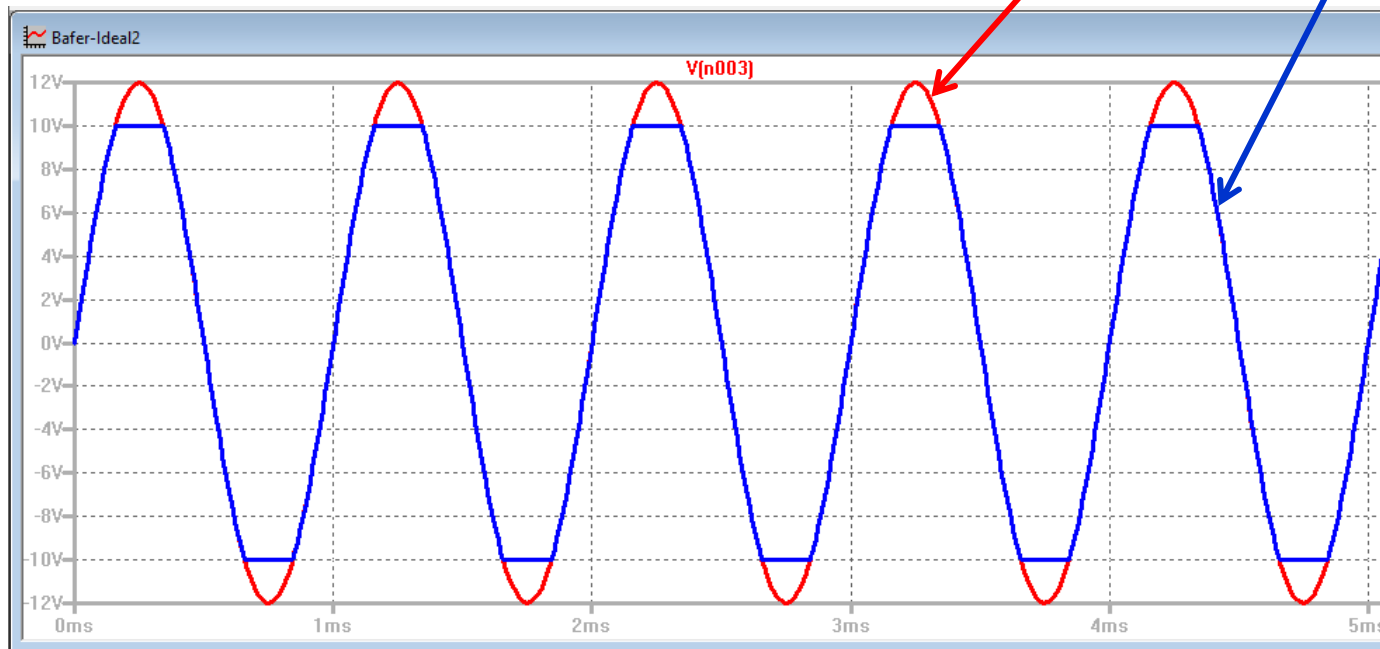
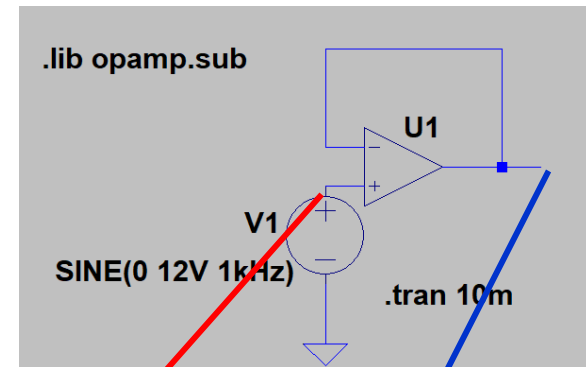
operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



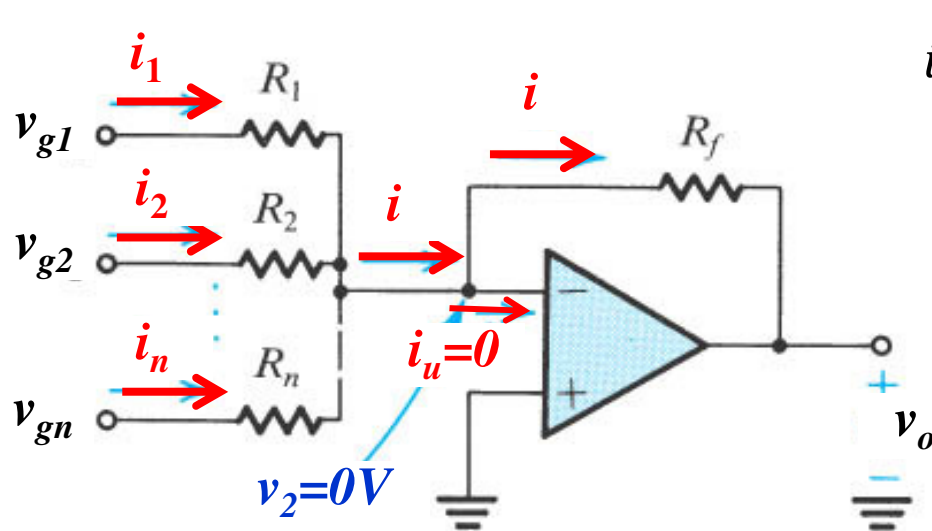
operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



operacioni pojačavač

Kolo za sabiranje – Weighted Summer



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

$$v_o = 0 - iR_f$$

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

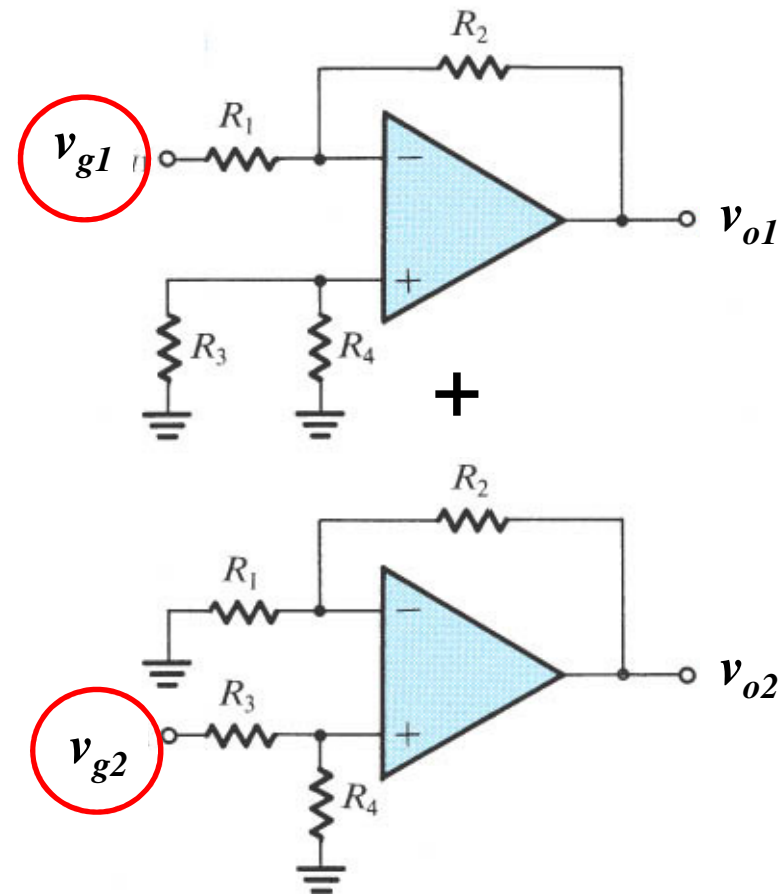
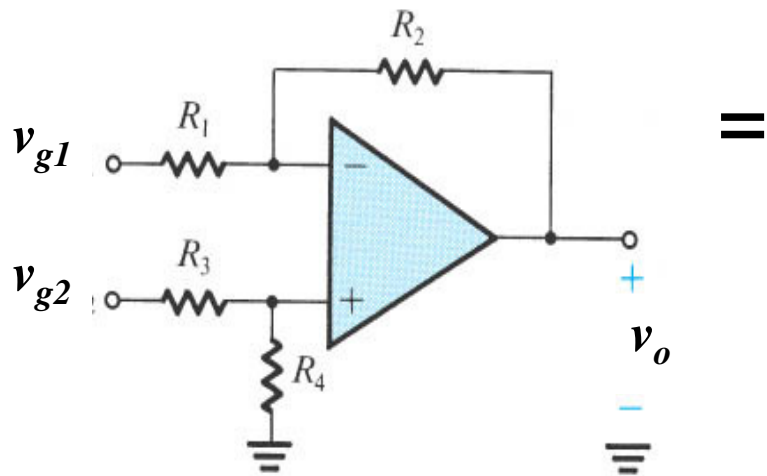
Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – pojačavač razlike

Ideja: Izjednačiti pojačanja invertorskog i neinvertorskog i napraviti pojačavač razlike signala

Metod superpozicije:

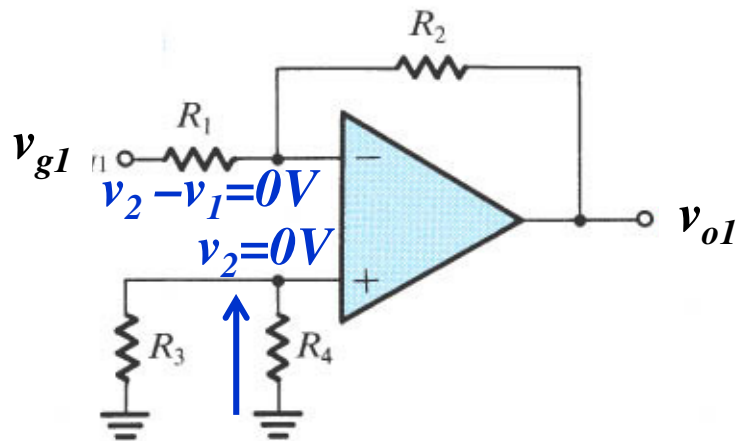
Posebno posmatramo uticaj svakog signala dok je drugi anuliran ($=0V$); rezultate saberemo



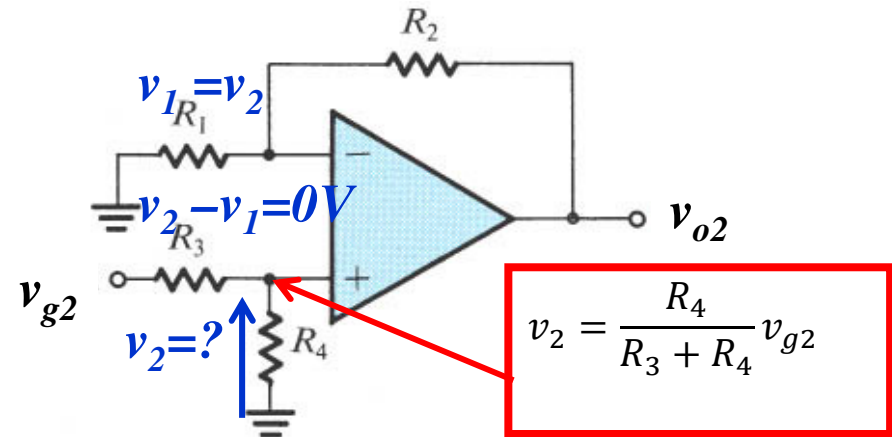
Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Ideja: Izjednačiti pojačanja invertorskog i neinvertorskog ulaza i napraviti pojačavač razlike signala



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

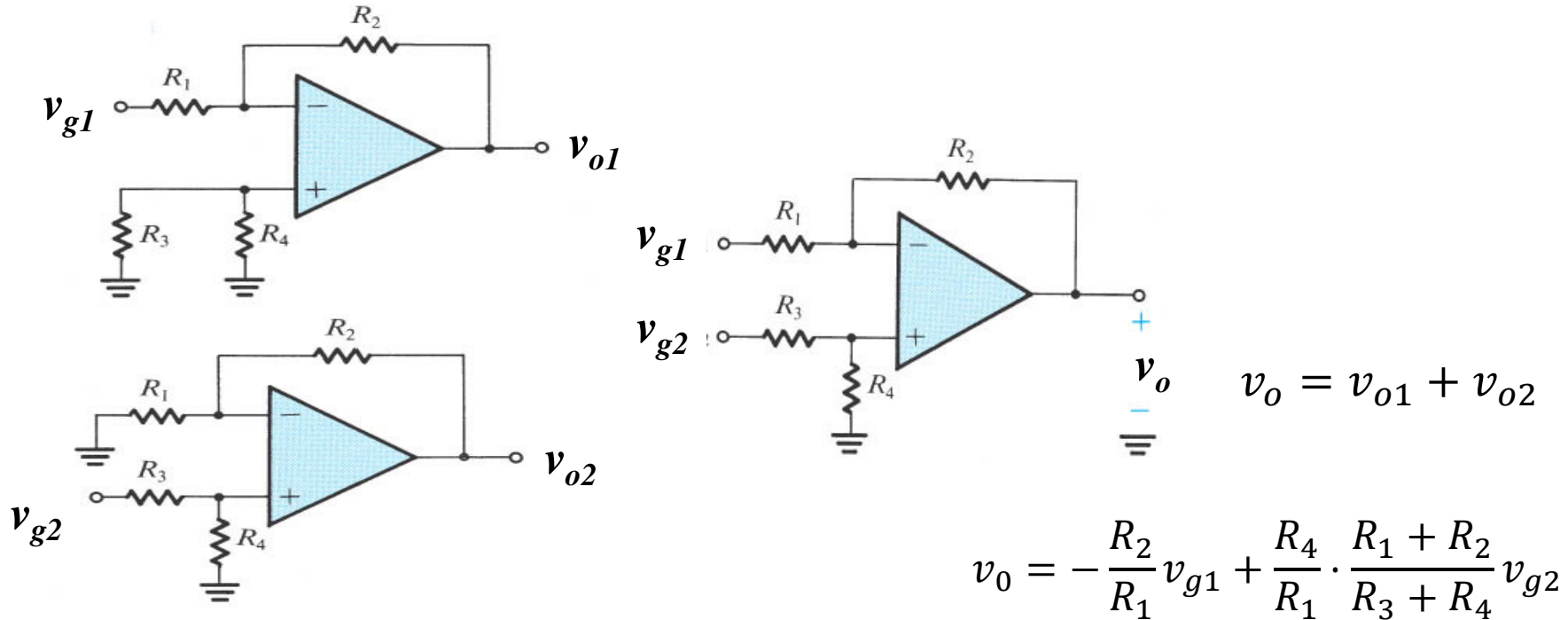


$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{g2}$$

$$v_{o2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{g2} = \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_{g2}$$

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač



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.

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

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

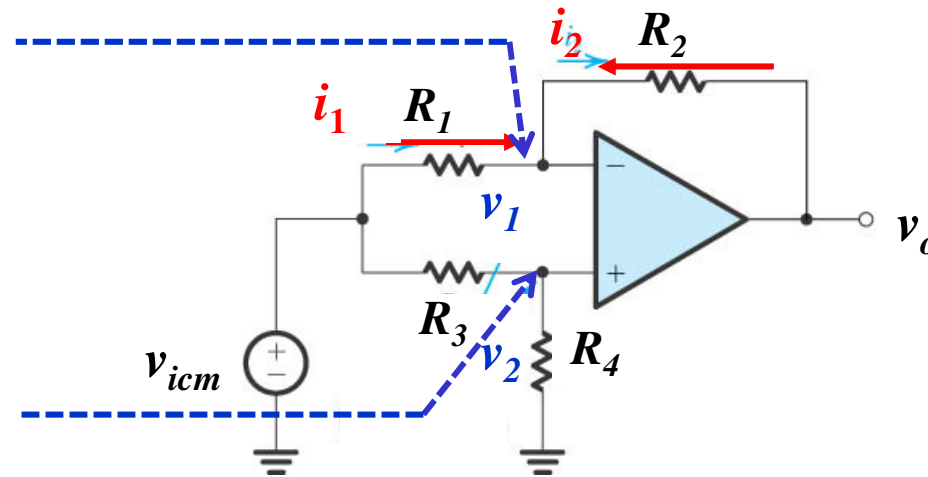
Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – A_{cm} u zatvorenoj petlji

Pojačanje srednje vrednosti idealnog diferencijalnog pojačavača je jednako nuli.

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

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

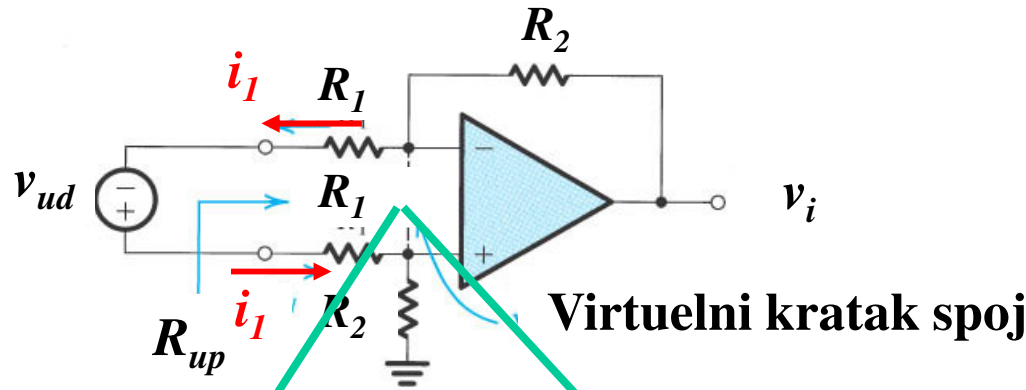


$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{icm} + \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_{icm} = v_{icm} \cdot \left(\frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1} \right)$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač - R_u



$$R_{up} \equiv \frac{v_{ud}}{i_1}$$

$$v_{ud} = R_1 i_1 + (v_+ - v_-) + R_1 i_1 = 2 \cdot R_1 \cdot i_1 + 0 = 2 \cdot R_1 \cdot i_1$$

$$R_{up} = \frac{v_{ud}}{i_1} = 2R_1$$

Ako se zahteva veliko R_w , R_1 mora da bude veliko!

veliko pojačanje ($A_d=R_2/R_1$) zahteva još veće R_2

Diferencijalni pojačavač

Postoje primene u kojima se zahteva velika ulazna otpornost diferencijalnog pojačavača kako se signal ne bi oslabio.

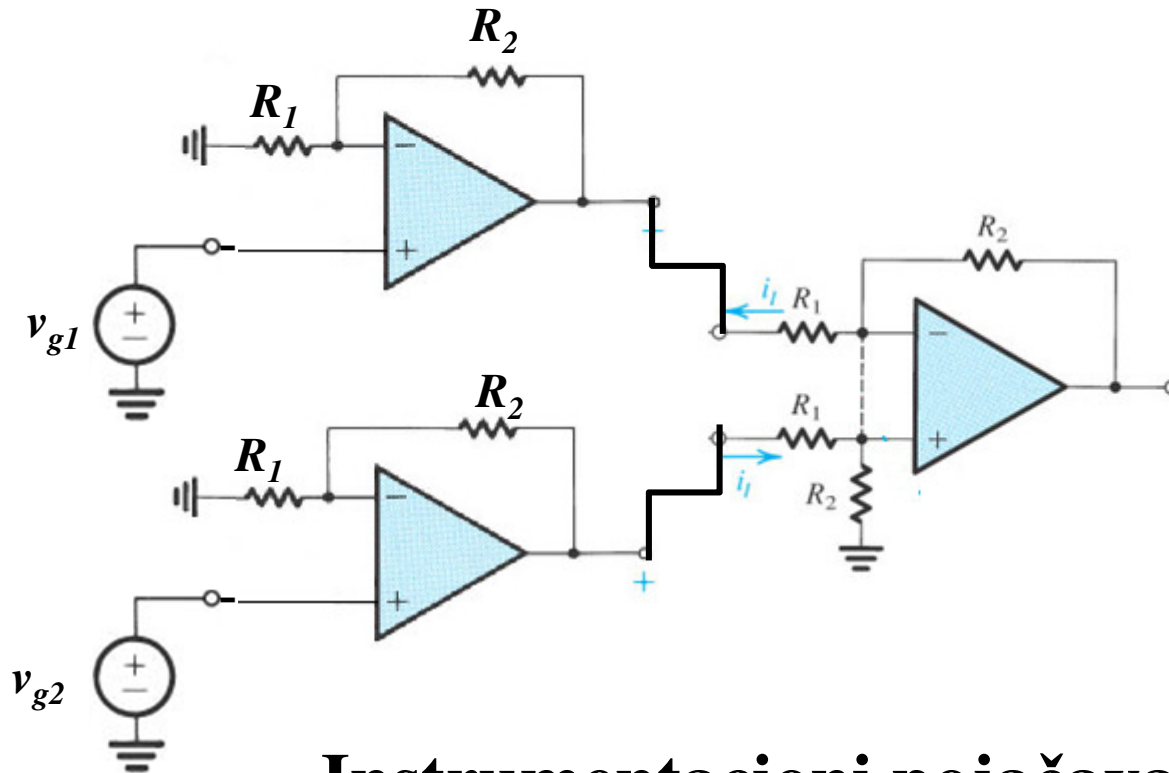
Jedna od tih primena je merenje: V-metar mora da ima jako veliku ulaznu otpornost da ne bi uticao na napon koji se meri.

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?

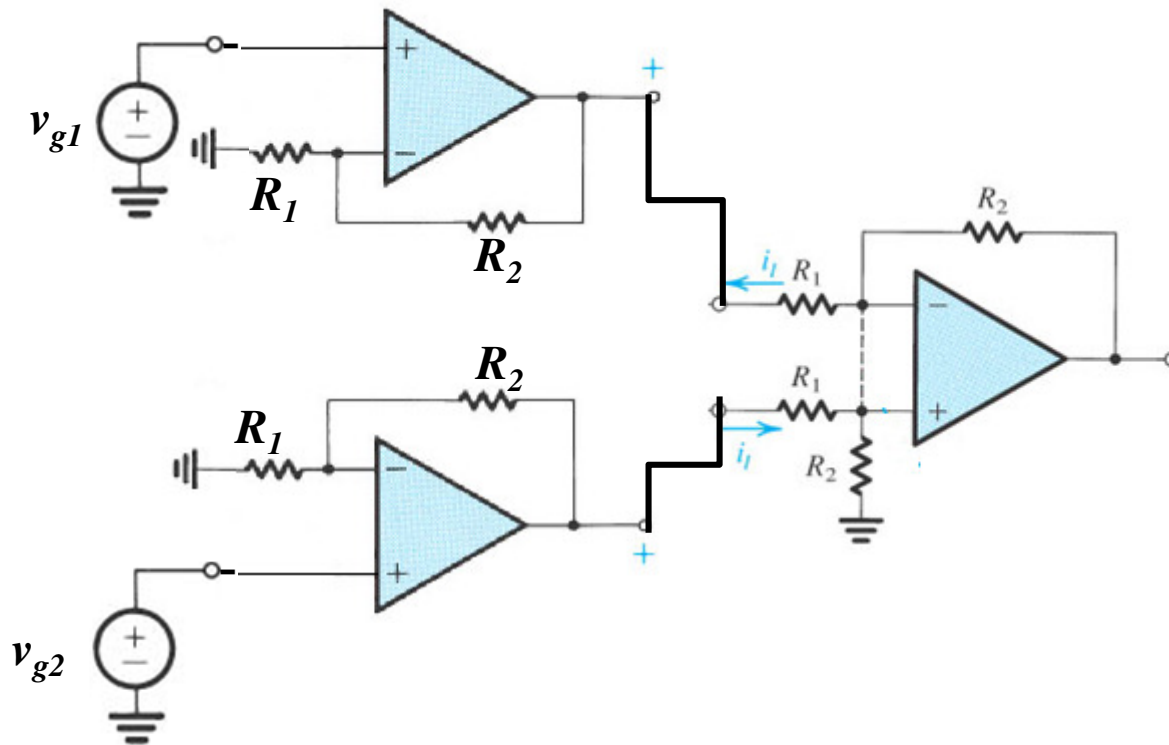


Instrumentacioni pojačavač

Idealni operacioni pojačavač

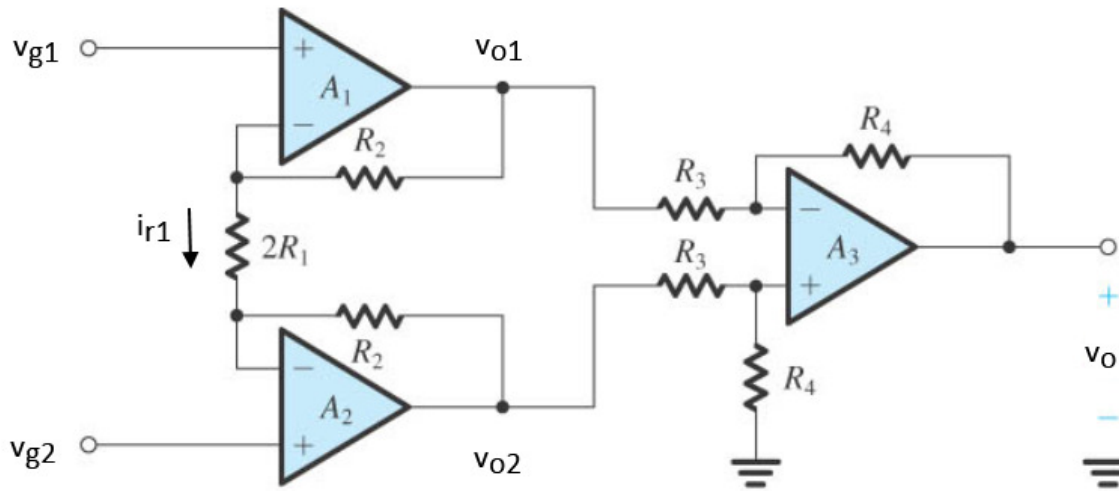
Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač



Instrumentacioni pojačavač se sastoji od dva stepena. Prvi stepen, koji ima ulogu bafera sastoji se od dva operaciona pojačavača. Drugi stepen čini balansni diferencijalni pojačavač. Zahvaljujući prvom stepenu instrumentacioni pojačavač ima visoku ulaznu impedansu.

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

$$v_{o1} - v_{o2} = i_{r1} \cdot (2 \cdot R_1 + 2 \cdot R_2)$$

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

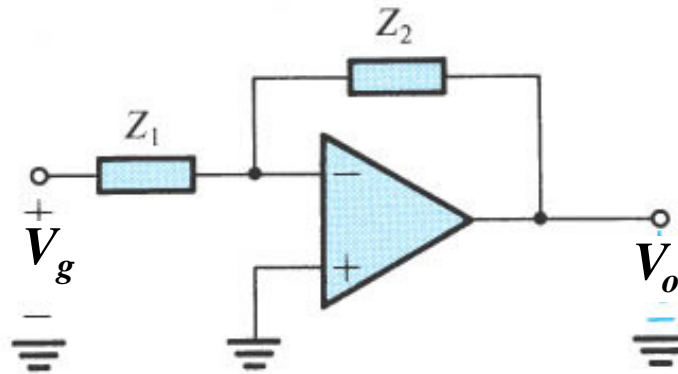
$$v_o = \frac{R_4}{R_3} (v_{o2} - v_{o1})$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Invertujući pojačavač sa impedansama –

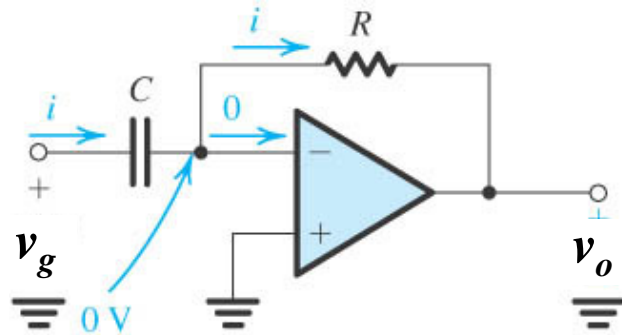
$A(s)$ u zatvorenoj petlji (ZP)



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

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje – f karakteristika



$$\left. \begin{aligned} (v_1 - v_g) \cdot j\omega C + (v_1 - v_o) \cdot \frac{1}{R} &= 0 \\ v_1 &= v_1 = 0 \end{aligned} \right\} sC v_g = -\frac{v_i}{R} \Rightarrow v_o = -s \cdot R \cdot C \cdot v_g$$

$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -s \cdot R \cdot C$$

$$A(s) = -\frac{s}{\omega_o} \quad \omega_o = \frac{1}{R \cdot C}$$

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje – f karakteristika

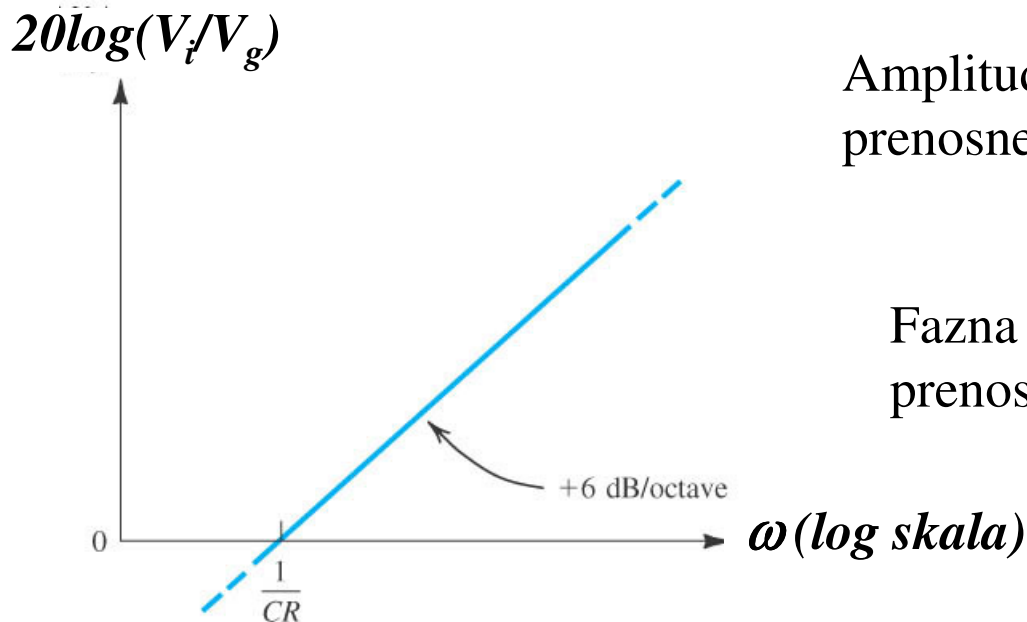
$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -sRC = -\frac{s}{\omega_0}$$

Amplitudska karakteristika je zavisnost modula prenosne funkcije od frekvencije.

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

Fazna karakteristika je zavisnost argumenta prenosne funkcije od frekvencije.

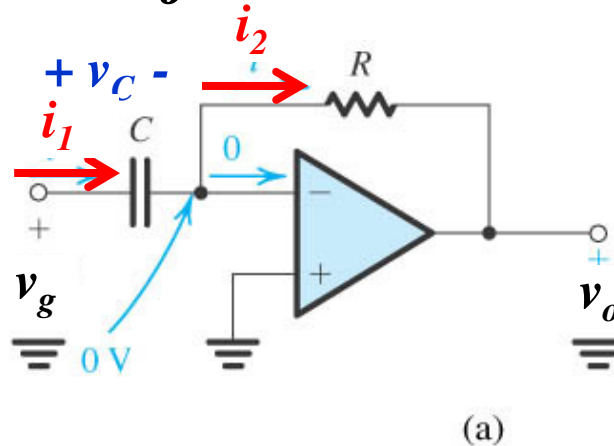
$$\arg(A(j\omega)) = -\pi/2$$



Ponaša se kao filter propusnik visokih frekvencija sa graničnom frekvencijom u beskonačnosti

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



Struja i i napon na kondenzatoru povezani su sledećim jednačinama.

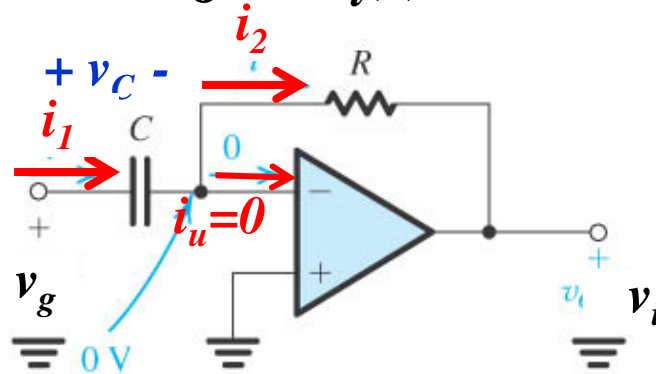
$$i_c(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$
$$Q(t) = C \cdot v_C(t)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= C \frac{dv_C(t)}{dt} = C \frac{d(v_g(t) - 0)}{dt} \\ v_o(t) &= -i_1(t) \cdot R \end{aligned} \right\} C \frac{dv_g(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)}{R}$$

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

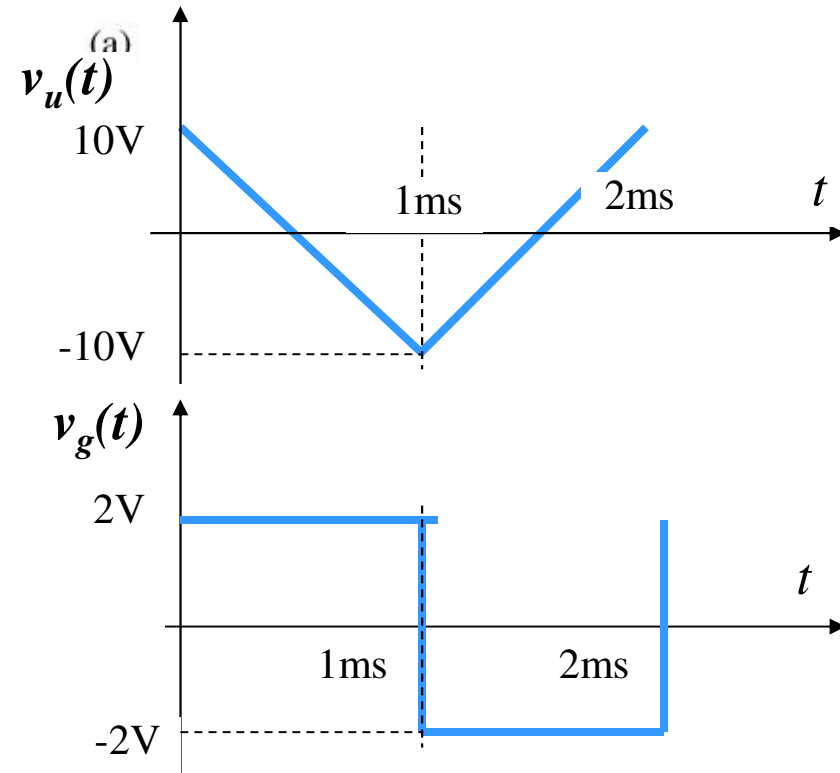
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



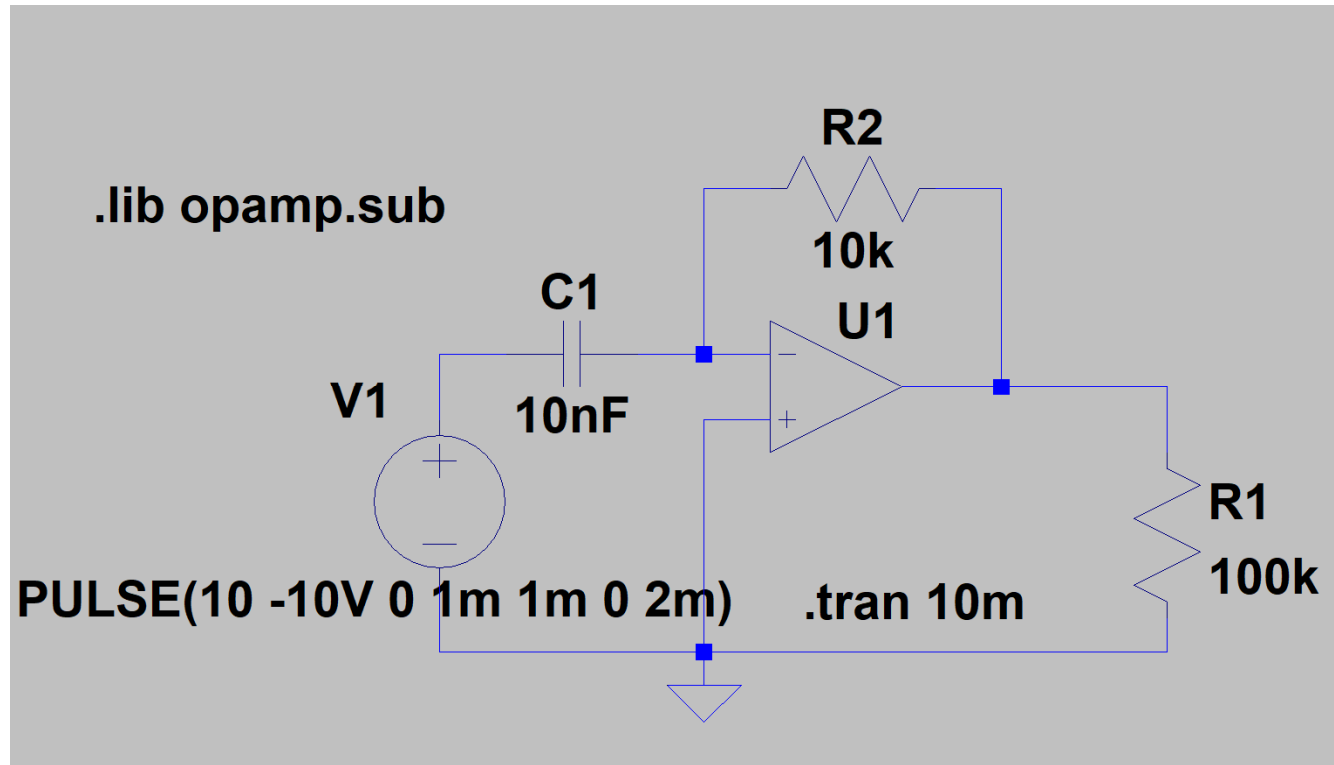
$$v_i = -RC \frac{dv_g}{dt}$$

Kako će izgledati talasni oblik napona na izlazu kola za diferenciranje sa $R=10k$ i $C=10nF$ ako se pobudi trougaonim talasnim impulsima sa slike:



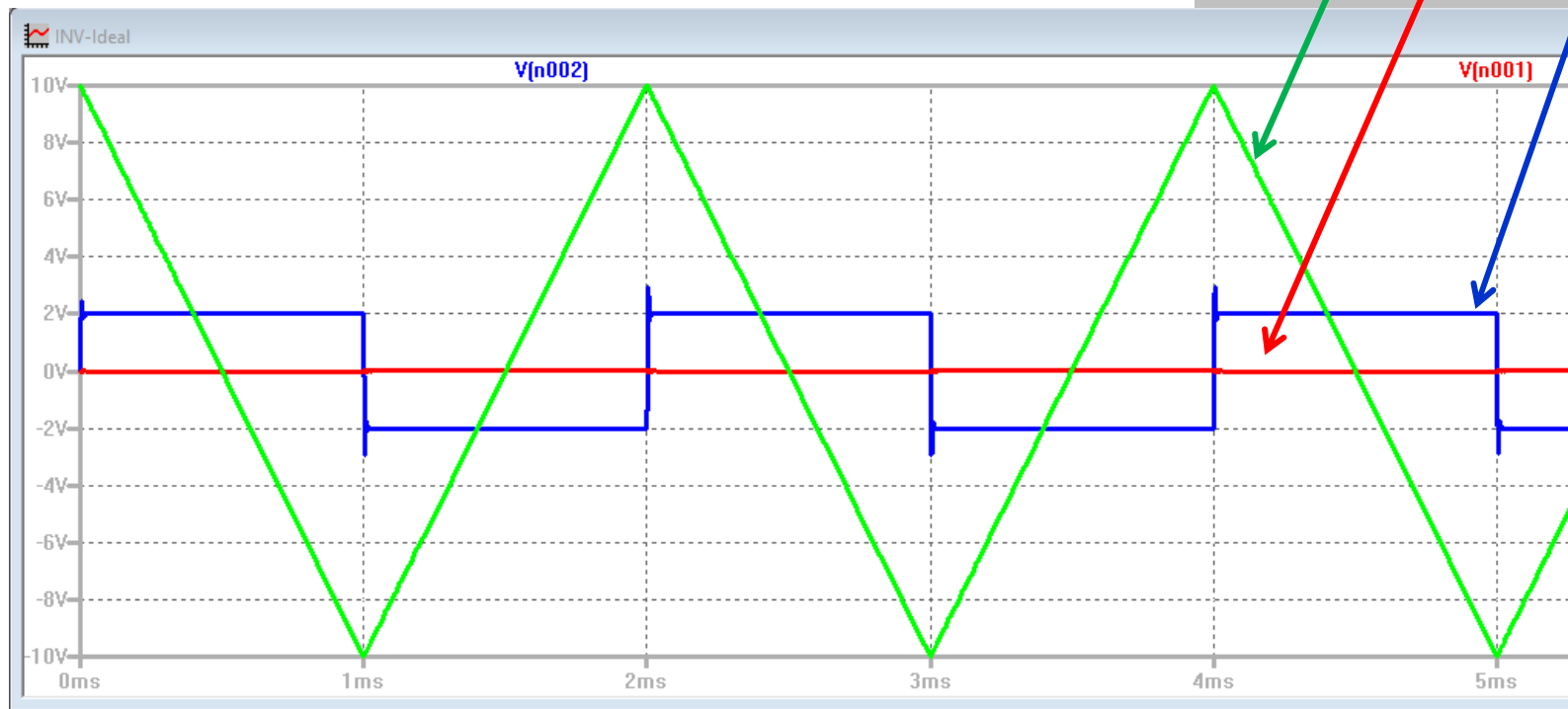
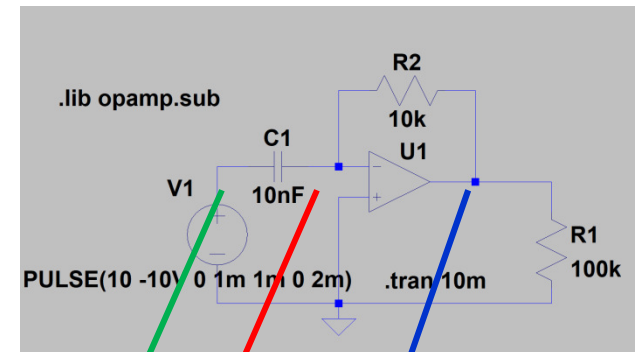
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



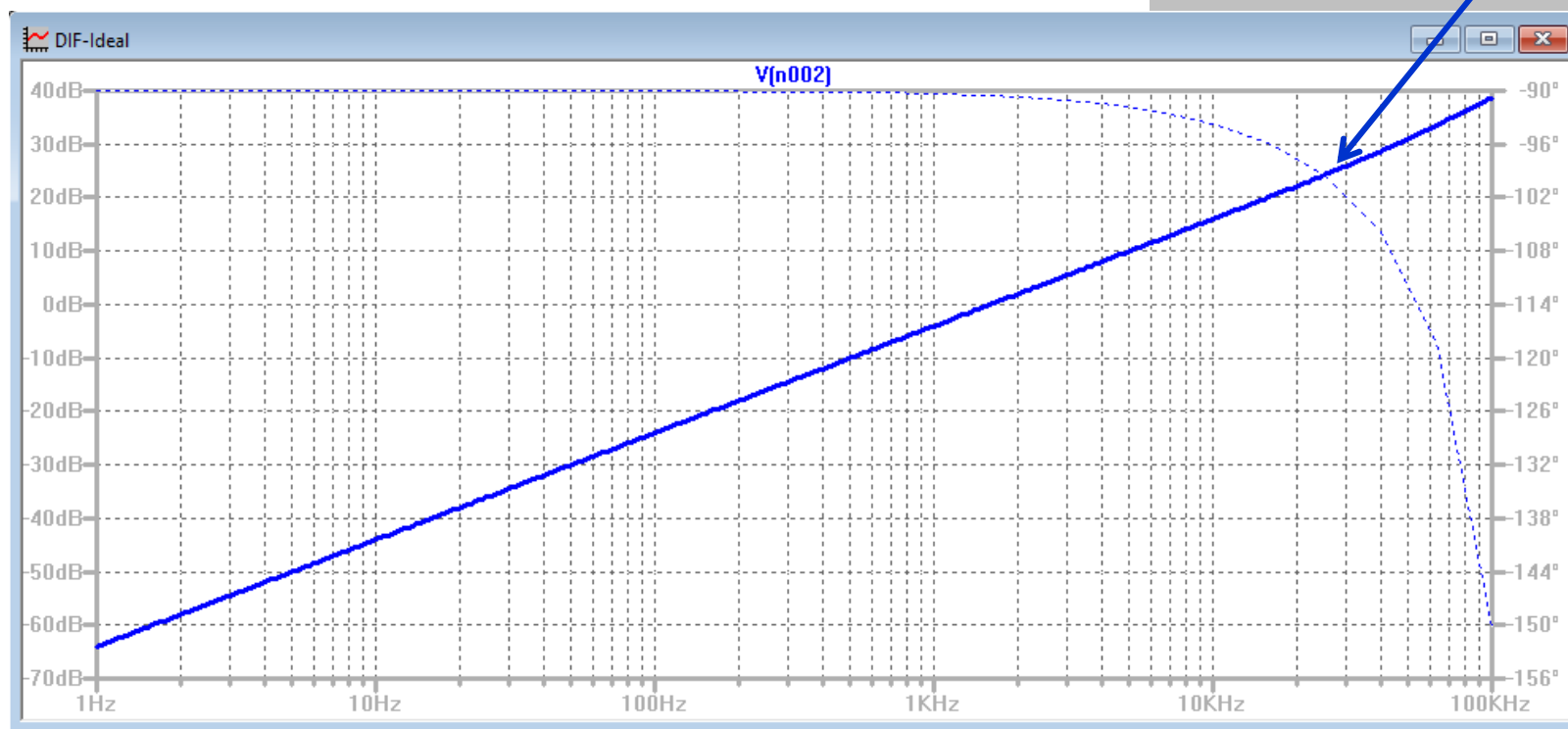
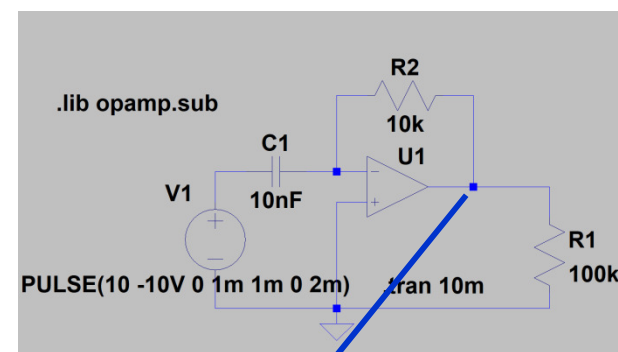
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



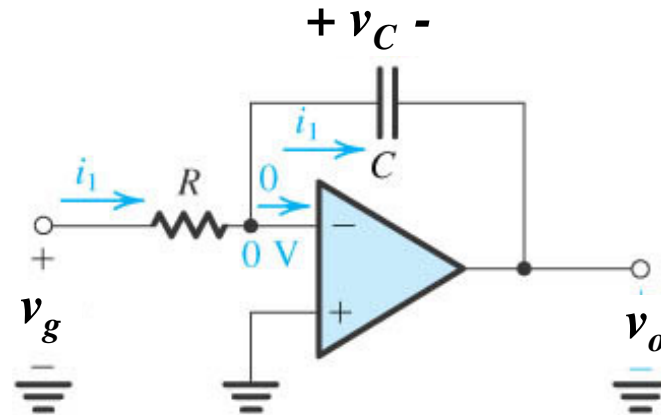
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika



$$\left. \begin{array}{l} (v_1 - v_o) \cdot j\omega C + (v_1 - v_g) \cdot \frac{1}{R} = 0 \\ v_1 = v_1 = 0 \end{array} \right\} v_o = -\frac{1}{RCs} v_g$$

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

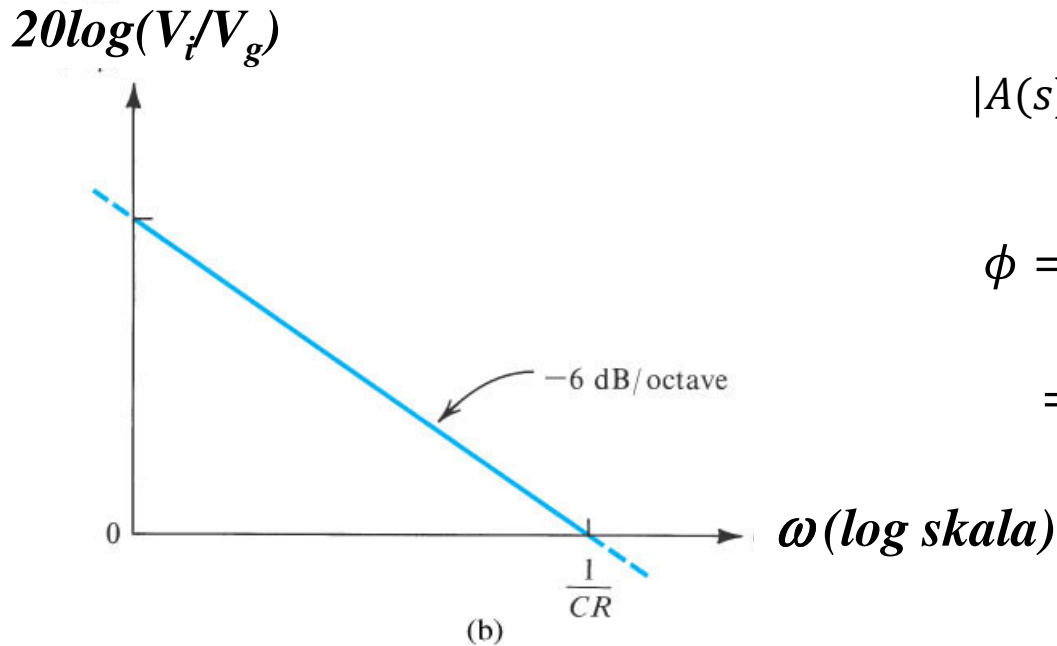
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika

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

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

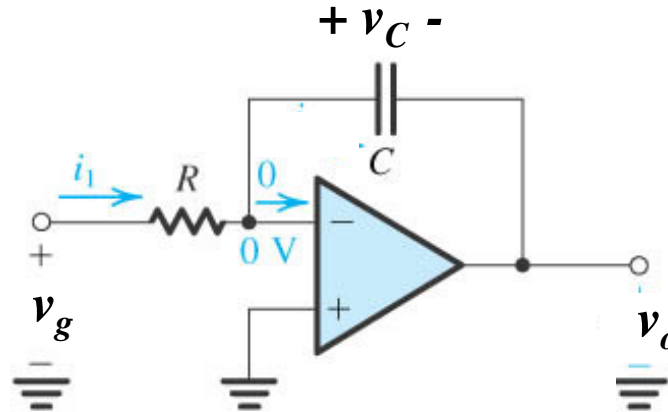
$$\begin{aligned}\phi &= \arctg \left[\frac{\text{Im}\{A(s)\}}{\text{Re}\{A(s)\}} \right] = \\ &= \arctg \left[\frac{1/\omega RC}{0} \right] = \pi/2\end{aligned}$$



Ponaša se kao NF filter sa graničnom frekvencijom u nuli

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - $v_i(t)$



$$i_1(t) = \frac{v_g(t) - 0}{R} = \frac{v_g(t)}{R}$$

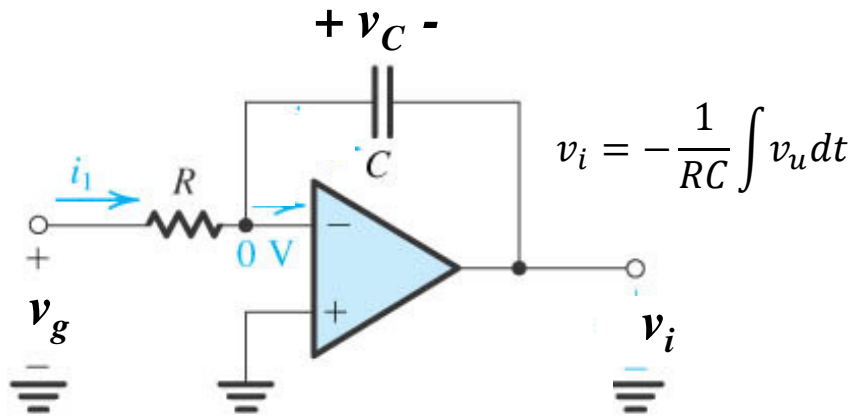
$$i_1(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

$$v_C(t) = -v_o(t)$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_g(t) dt$$

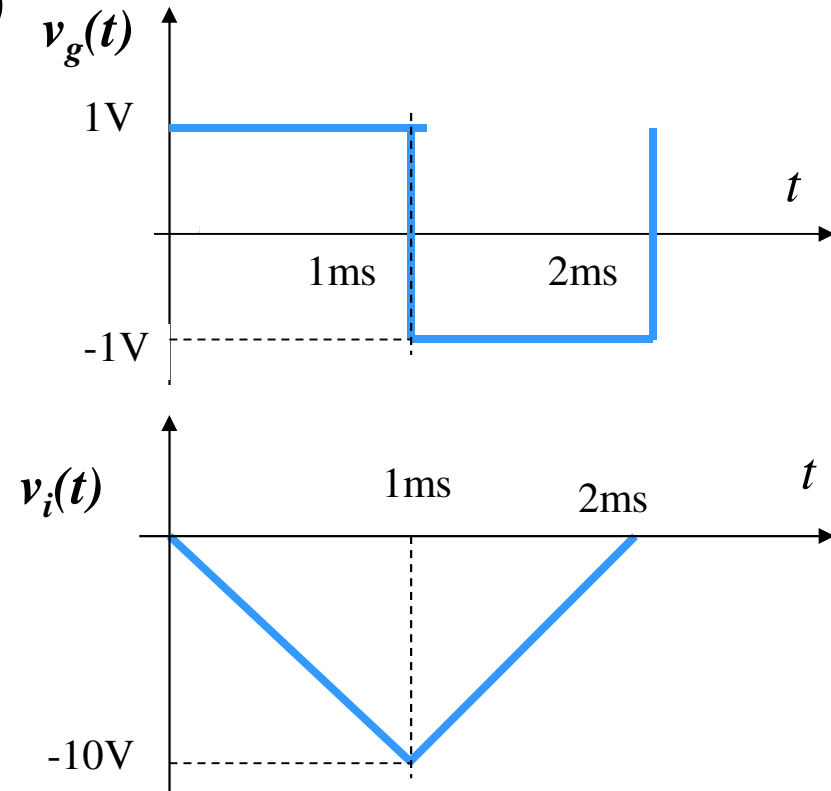
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - $v_i(t)$



$$R=10k$$

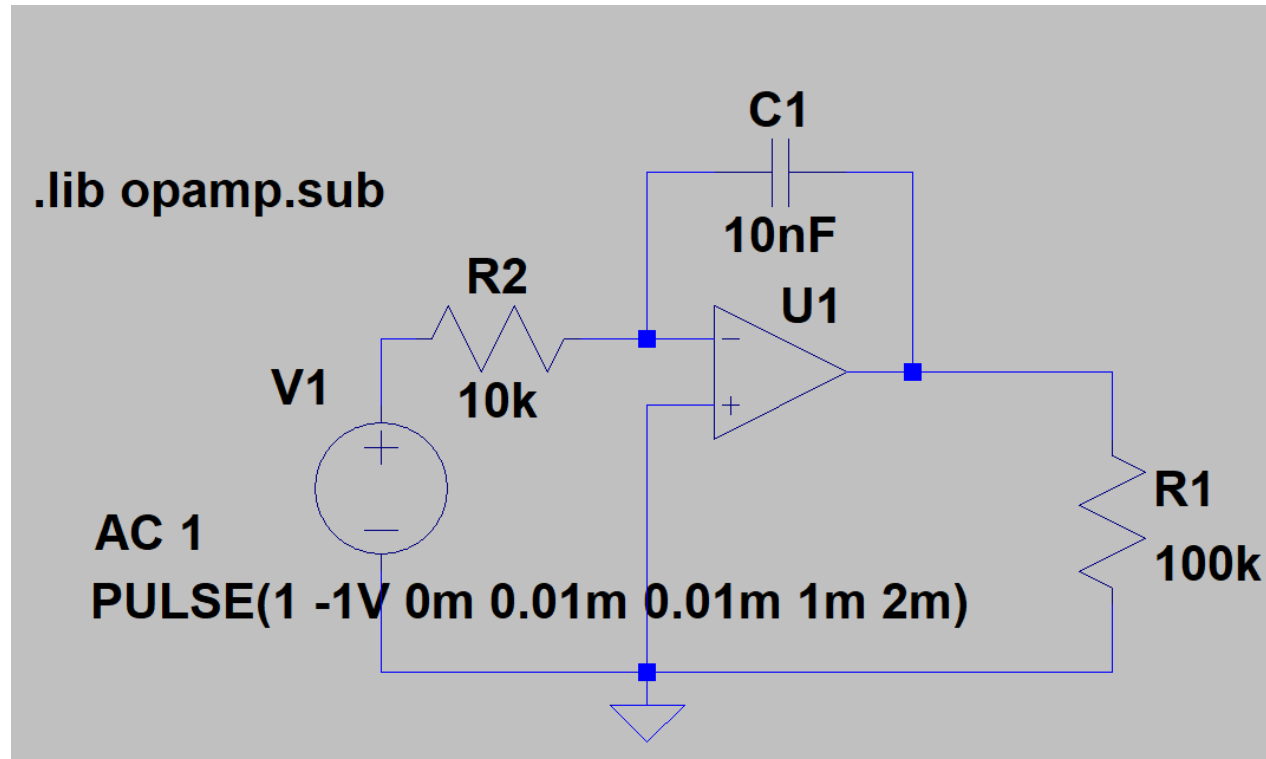
$$C=10nF$$



$$v_i = -\frac{1}{RC} \int v_g(t) dt = \frac{1}{10^4 \cdot 10^{-8}} \int_0^{T=2ms} v_g(t) dt = -10^4 \cdot 1V \left(\int_0^{T/2=1ms} dt - \int_{T/2=1ms}^{T=2ms} dt \right)$$

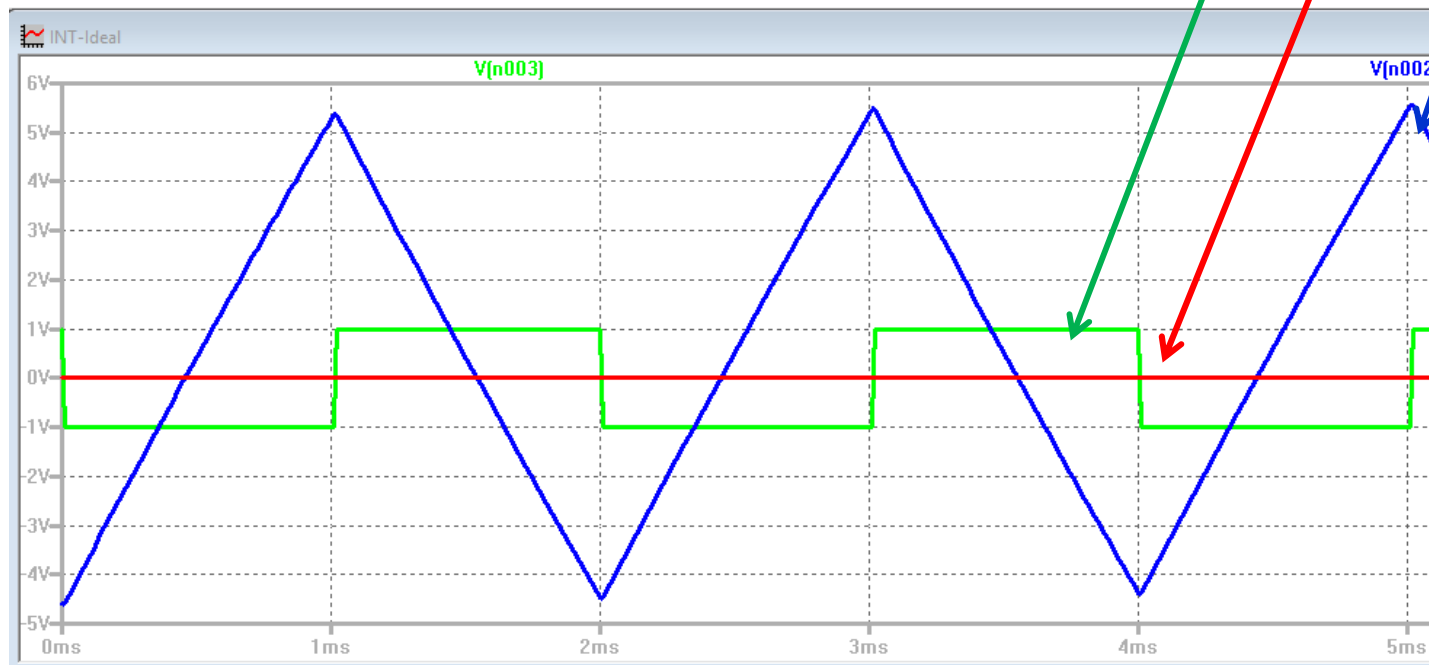
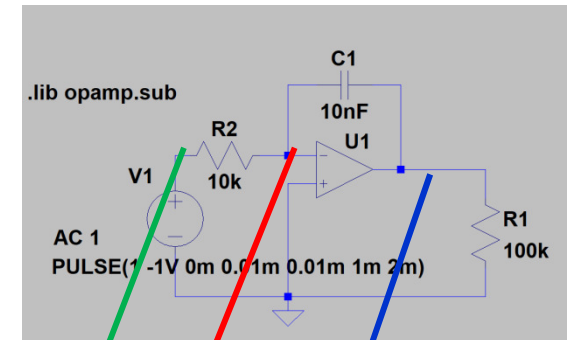
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje



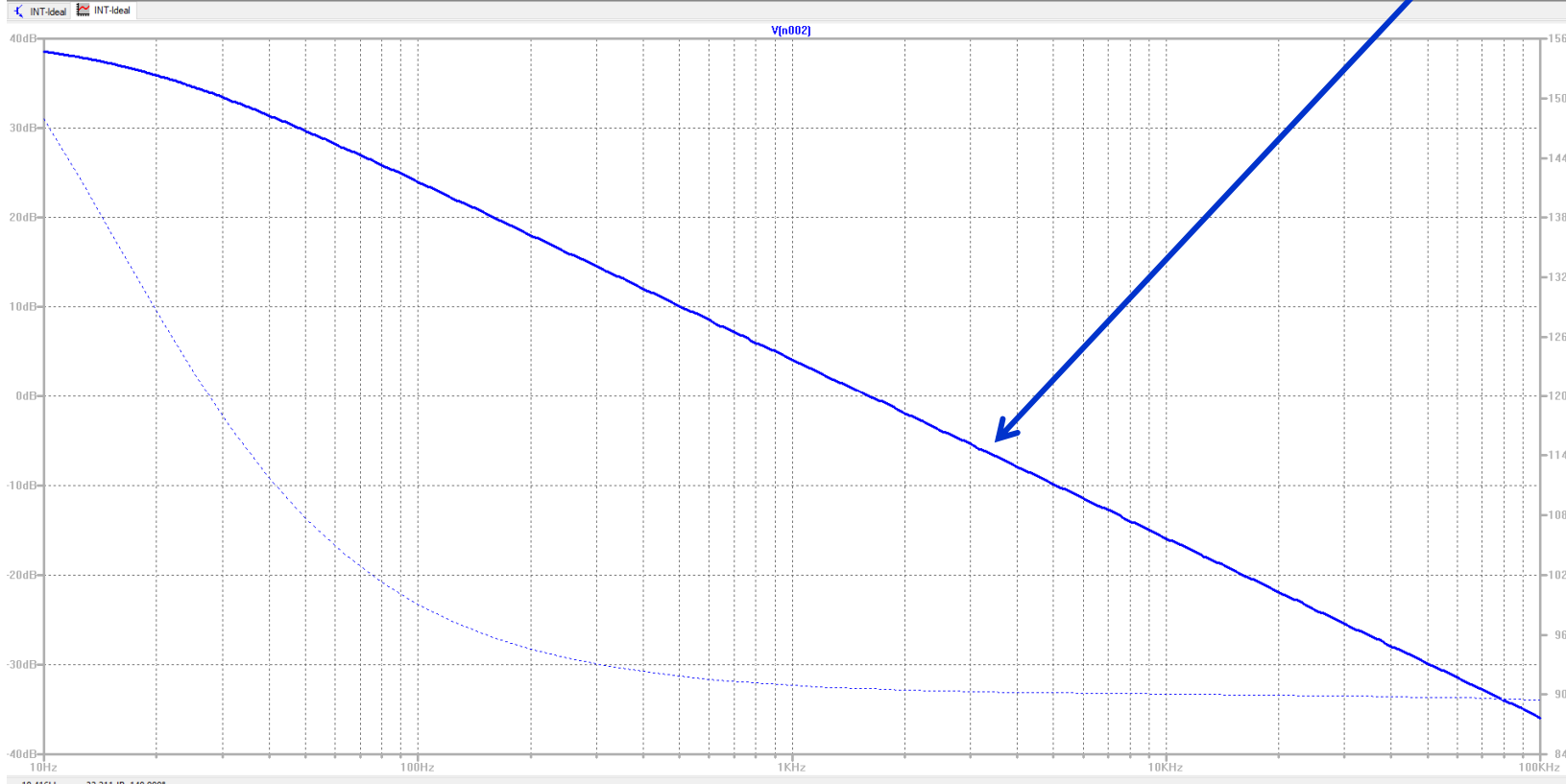
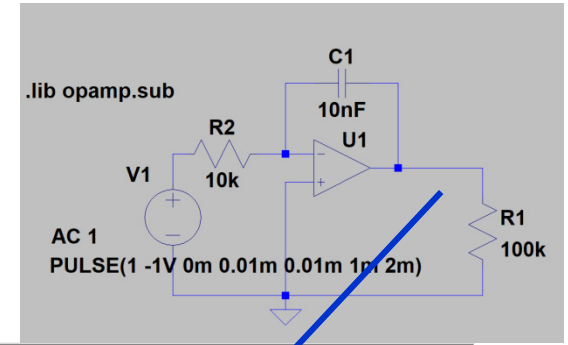
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje



Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje



Idealni operacioni pojačavač

Logaritamski pojačavač

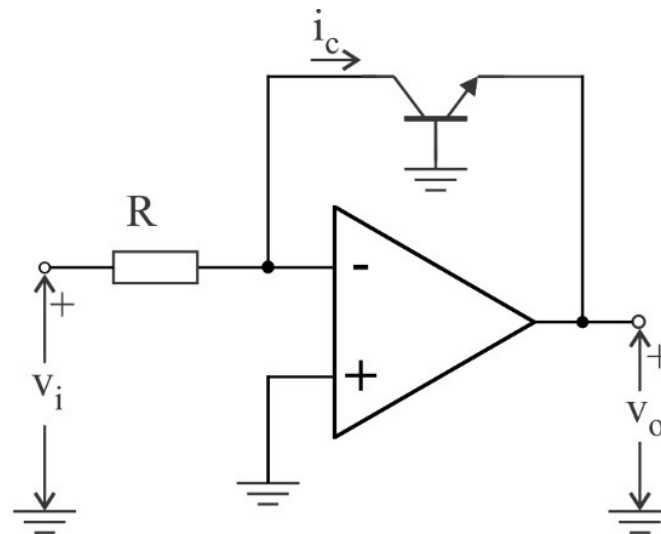
Logaritamski pojačavač daje izlazni napon proporcionalan logaritmu ulaznog napona. Rad logaritamskog pojačavača zasniva se na primeni strujno naponske karakteristike direktno polarisanog pn spoja diode ili bipolarnog tranzistora. Ovim kolom može se ostvariti pojačanje u vrlo velikom opsegu ulaznog napona.

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

$$i_C = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$

$$v_o = -v_{BE}$$

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



Idealni operacioni pojačavač

Eksponecijalni pojačavač

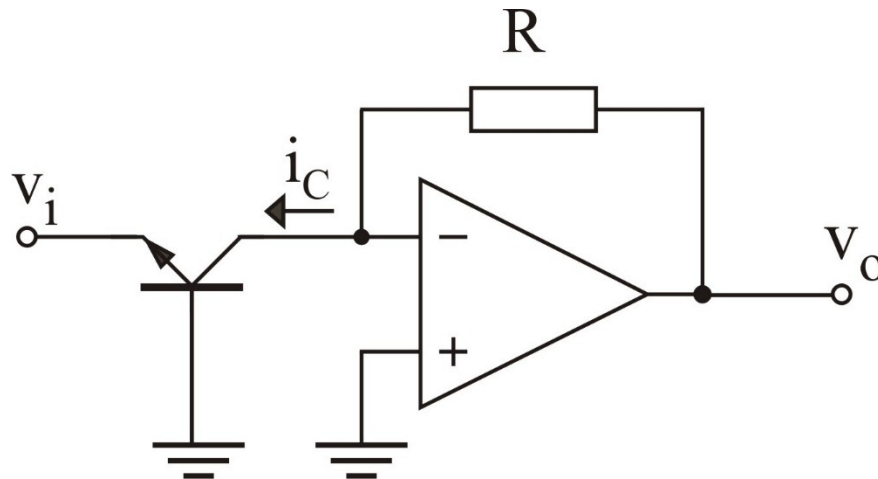
Eksponecijalni pojačavač daje na izlazu napon koji je eksponecijalna funkcija ulaznog napona. Ovo kolo se obično koristi zajedno sa logaritamskim pojačavačem za dekompresiju signala. Princip rada zasniva se na strujno naponskoj karakteristici direktno polarisanog pn spoja.

$$v_o = i_c \cdot R$$

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

$$\underline{v_i = -v_{BE}}$$

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

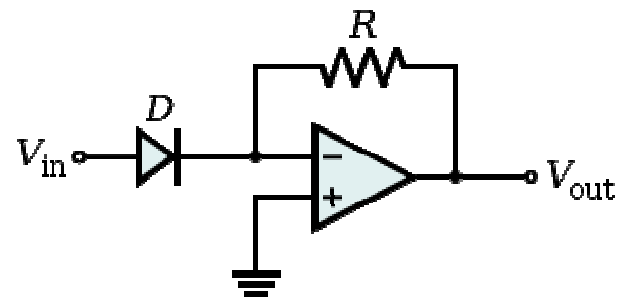
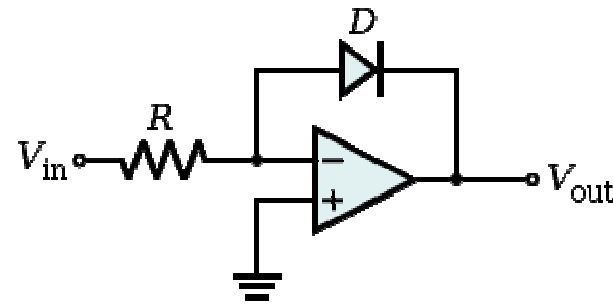


Zašto “Operacioni”?

Mogu da se koriste za različite računске OPERACIJE

- Sabiranje,
 - Oduzimanje
 - Diferenciranje
 - Integraljenje
 - Logaritmovanje,
- ali i

- Antilogaritmovanje
- Množenje
- Deljenje

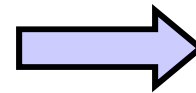


Idealni operacioni pojačavač

Da se podsetimo:

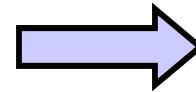
idealne operacione pojačavače karakterišu:

beskonačno pojačanje
razlike ulaznih signala



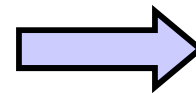
$$v_u = v_d = v_+ - v_- = 0 \\ v_+ = v_-$$

beskonačna ulazna otpornost



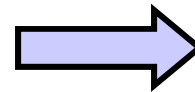
$$i_u = 0, v_u \neq f(R_g)$$

izlazna otpornost jednaka nuli



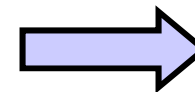
$$v_i \neq f(R_p)$$

ne pojačava srednju vrednost



$$A_{cm} = 0$$

beskonačni propusni opseg

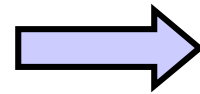


idealne f k-ke

Realni operacioni pojačavač

Realne operacione pojačavače karakterišu:

Konačno pojačanje
razlike ulaznih signala



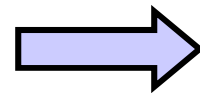
$$v_u = v_d = v_+ - v_- = v_i / A, \\ v_+ \neq v_-$$

ulazna otpornost konačna



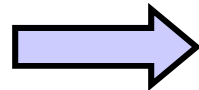
$$i_u \neq 0, v_u = f(R_g)$$

izlazna otpornost konačna



$$v_i = f(R_p)$$

pojačava *srednju vrednost*



$$A_{cm} \neq 0$$

propusni opseg konačan

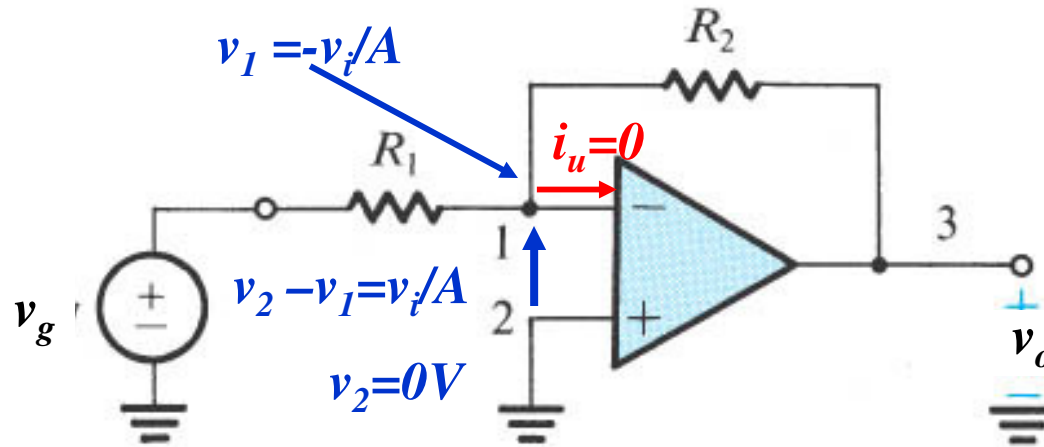


realne f k-ke

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog pojačanja

Invertorski pojačavač

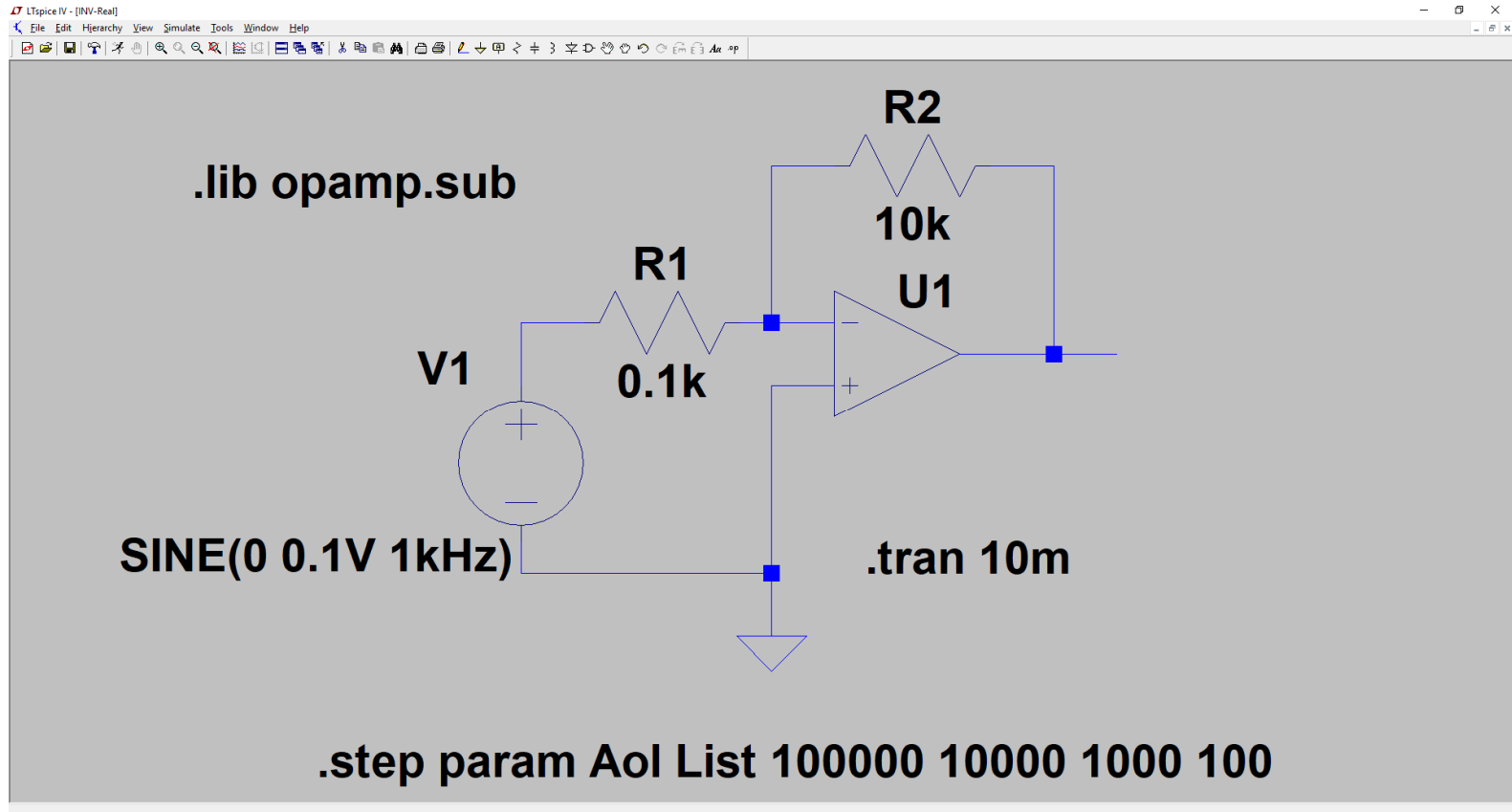


$$\left. \begin{array}{l} \frac{v_1 - v_g}{R_1} + \frac{v_1 - v_o}{R_2} = 0 \\ v_o = A \cdot (v_2 - v_1) = -A \cdot v_1 \end{array} \right\} A_r = \frac{v_i}{v_g} = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 \cdot A}}$$

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog pojačanja

Invertorski pojačavač



Realni operacioni pojačavač

Zadatak: Za invertorski pojačavač pobuđen naponom $v_g=0.1V$ kod koga je $R_1=0.1k$ i $R_2=10k$ u kome se koriste OpAmp sa pojačanjem u OP od $A=60dB$, $80dB$ i $100dB$ i odrediti:

- a) Pojačanje u zatvorenoj petlji
- b) Procentualnu promenu pojačanja u zatvorenoj petlji u odnosu na slučaj sa idealnim OpAmpom
- c) Veličinu napona na ulazu OpAmpa

Rešenje

a)(90,83; 99,00; 99,90); b)(-9,17%; -1,00%; -0,10%); c)(-0,908mV; -0,99mV; -0,10mV)

Realni operacioni pojačavač

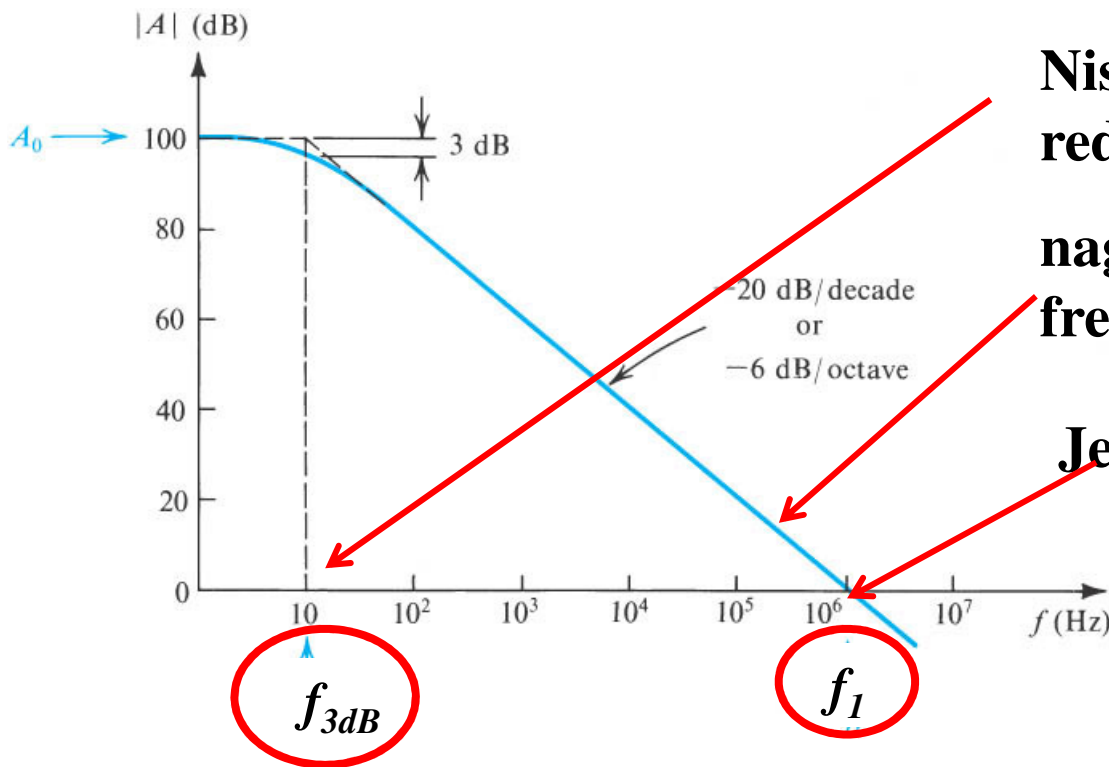
Efekti konačnog pojačanja **Tema za razmišljanje**

Zamenimo OpAmp koji ima $A=10,000\text{V/V}$ (80dB) sa drugim koji ima pojačanje $A=100,000\text{V/V}$ (100dB) (znači 1000%!!!) a pojačanje u zatvornoj petlji promeni se samo za 0.9% (sa 99V/V na 99.9V/V)

Da li je to dobro? 

Realni operacioni pojačavač

Frekvencijska karakteristika operacionog pojačavača u otvorenoj petlji



Niska “granična” frekvencija
reda desetak herca

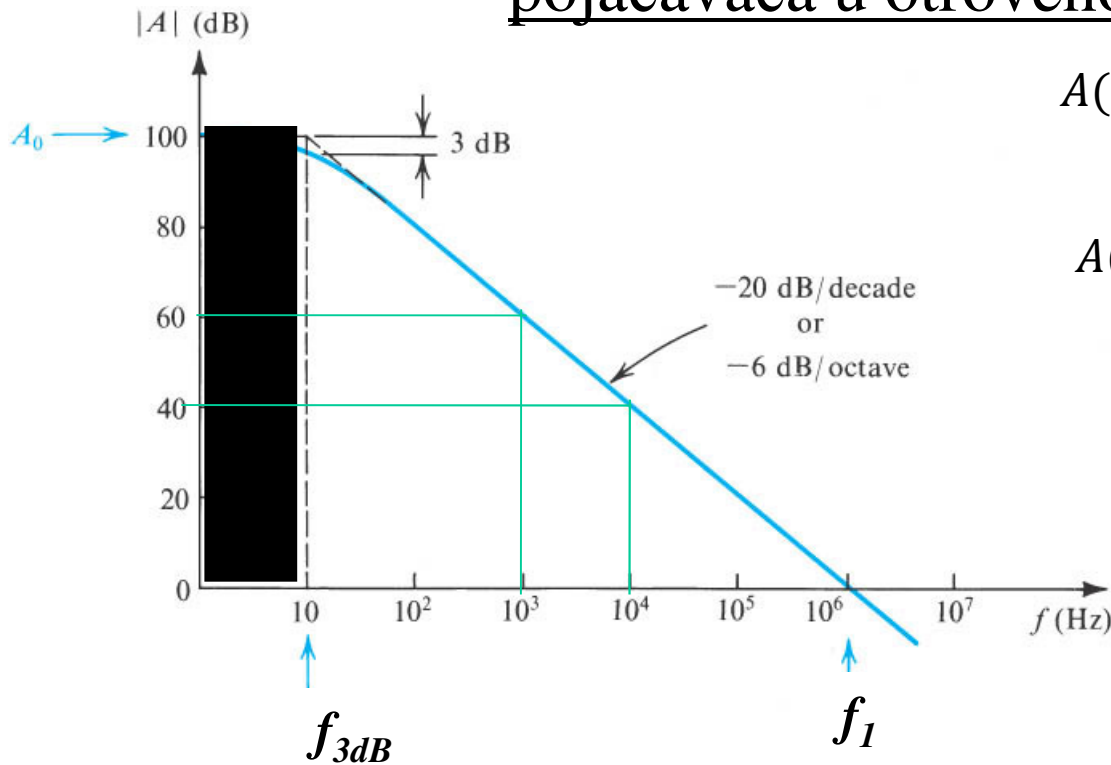
nagib -20dB/dec nakon granične
frekvencije

Jedinično pojačanje (0 dB).

Jedan **dominantan pol** na frekvenciji f_{3dB} . Dominantan je jer su frekvencije ostalih polova znatno veće. Odavde proizilazi da na niskim frekvencijama samo ovaj pol ima uticaj na frekvencijsku karakteristiku.

Realni operacioni pojačavač

Frekvencijska karakteristika operacionog pojačavača u otvorenoj petlji



$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_{3dB}} = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_{3dB}}$$

$$A(j\omega) \approx \frac{A_0\omega_{3dB}}{j\omega} \quad \text{za } \omega \gg \omega_{3dB}$$

$$|A(j\omega)| \approx \frac{A_0\omega_{3dB}}{\omega} \quad \text{za } \omega \gg \omega_{3dB}$$

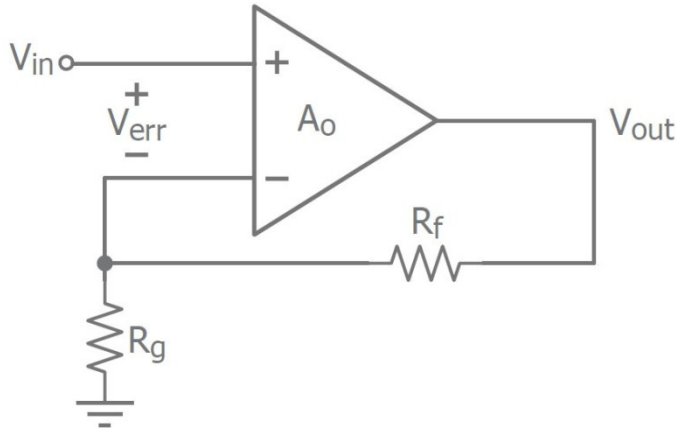
$$|A(j\omega)| = 1 \quad \text{za } \omega_1 = A_0\omega_{3dB}$$

$f_1 = \omega_1/2\pi$, daje se u katalogu kao **Gain Bandwidth Product (GB)**

Frekvencija na kojoj je pojačanje operacionog pojačavača jednako jedinici, ω_1 , jednak je proizvodu jednosmernog pojačanja A_0 i granične frekvencije ω_{3dB} (frekvencija na kojoj se pojačanje smanji za 3dB).

Realni operacioni pojačavač

Efeki konačnog *propusnog opsega*



$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$V_{out} = A(s) \cdot V_{err}$$

$$V_{err} = V_{in} - V_{out} \cdot \left(\frac{R_g}{R_f + R_g} \right)$$

Jednosmerno pojačanje kola sa povratnom spregom

$$A_{CL0} = \frac{R_f + R_g}{R_g}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{\omega_0 A_0}{A_{CL0}}$$

Proizvod jednosmernog pojačanja i granične frekvencije kola sa povratnom spregom je konstantan.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A(s)}{1 + A(s) \cdot \left(\frac{R_g}{R_f + R_g} \right)}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f + R_g}{R_g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A(s)} \cdot \left(\frac{R_g}{R_f + R_g} \right)}$$

$$A_{CL}(j\omega) = \frac{A_{CL0}}{1 + \frac{A_{CL0}}{A_0} + j \frac{\omega \cdot A_{CL0}}{A_0 \cdot \omega_0}} \approx \frac{A_{CL0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{3dB}}}$$

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog *propusnog opsega* (zatvorena petlja)

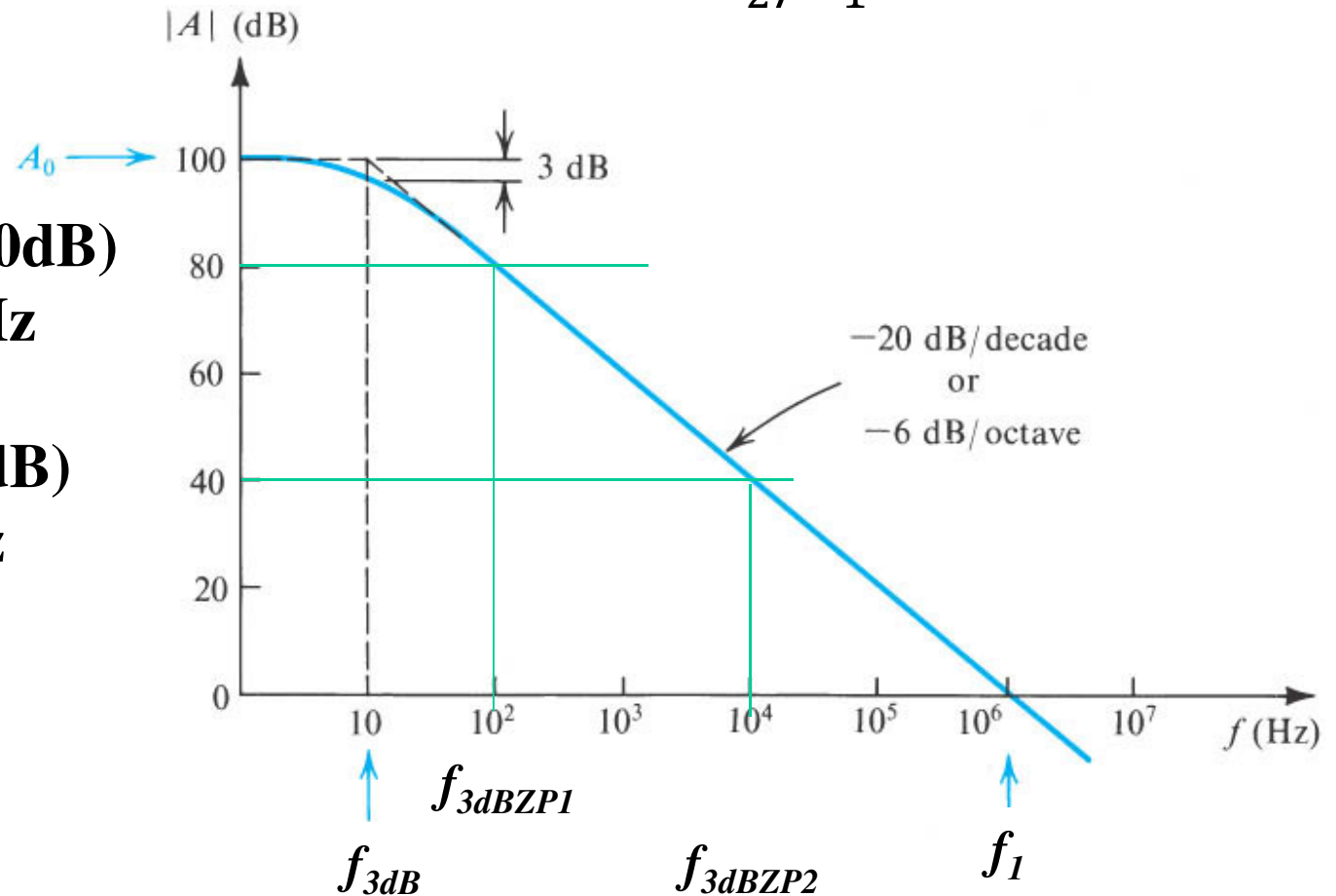
Invertorski pojačavač $\omega_{3dBZP} = \frac{\omega_1}{1 + R_2/R_1}$

$$|A| = R_2/R_1 = 10000 \text{ (80dB)}$$

$$f_{3dB} \approx f_1/10000 = 10^2 \text{ Hz}$$

$$|A| = R_2/R_1 = 100 \text{ (40dB)}$$

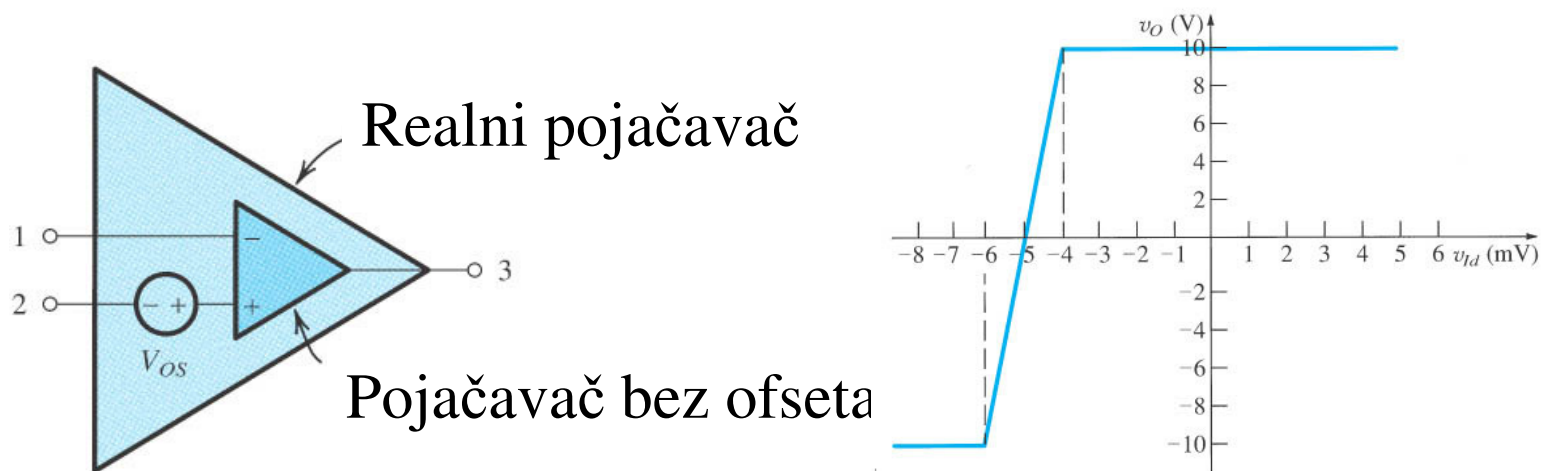
$$f_{3dB} \approx f_1/100 = 10^4 \text{ Hz}$$



Realni operacioni pojačavač

Naponski ofset (razdešenost)

- **Definicija:** Naponski ofset je napon koji treba dovesti između ulaznih priključaka tako da napon na izlazu bude jednak nuli.
- **Uzrok:** Ovaj nedostak je posledica nepodešenosti ulaznog pojačavača, odnosno neuparenosti tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Kada se ulazi kratkospoje napon na izlazu nije jednak nuli.
- **Tipična vrednost:** $1\text{mV} < V_{OS} < 5\text{mV}$.
- **Model:**



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** $\Delta V_{os}/T$ [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$].

Realni operacioni pojačavač

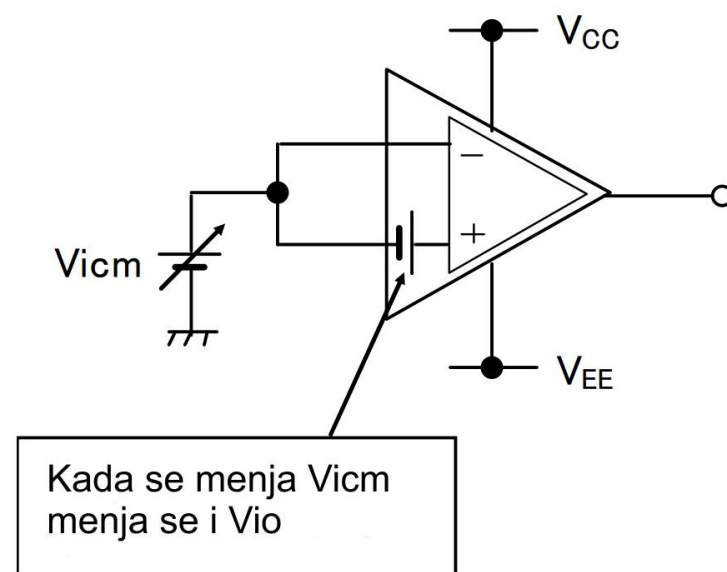
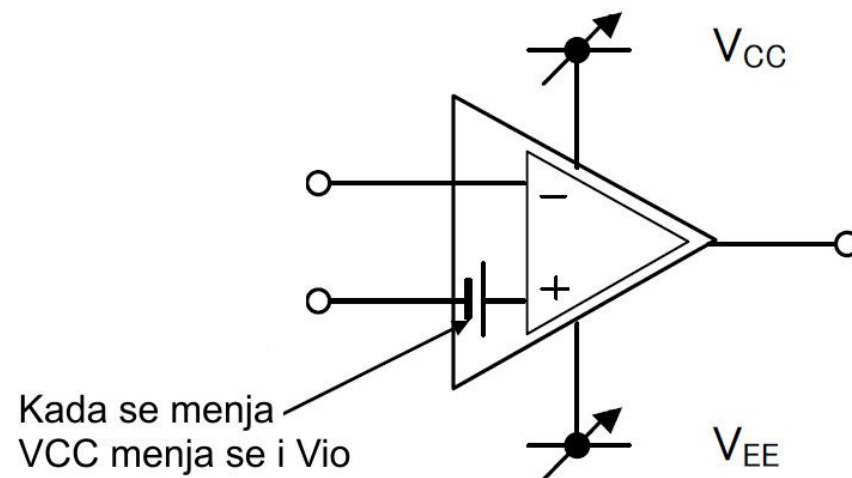
Naponski ofset (razdešenost)

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

$$PSRR = \frac{\Delta(V_{CC} - V_{EE})}{\Delta V_{io}}$$

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

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



Realni operacioni pojačavač

Strujni ofset (razdešenost)

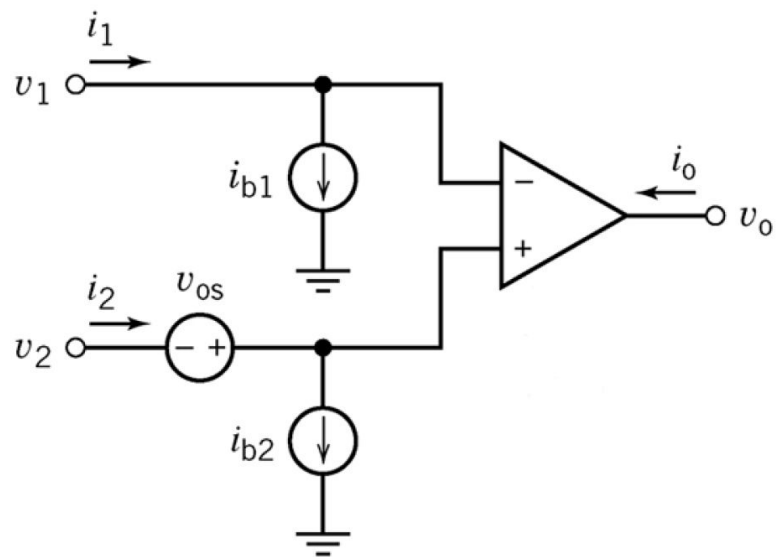
- **Definicija:** Struja razdešenosti na ulazu predstavlja razliku između ulaznih struja polarizacija, $I_{OS} = I_{B1} - I_{B2}$.
- **Uzrok:** Ulazne struje su jednosmerne struje polarizacije bipolarnih tranzistora u diferencijalnom pojačavaču. Ove struje su kod MOSFET operacionih pojačavača zanemarive.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

▪ Tipične vrednosti za bipolarni O.P.

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

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

▪ Modeliranje



Realni operacioni pojačavač

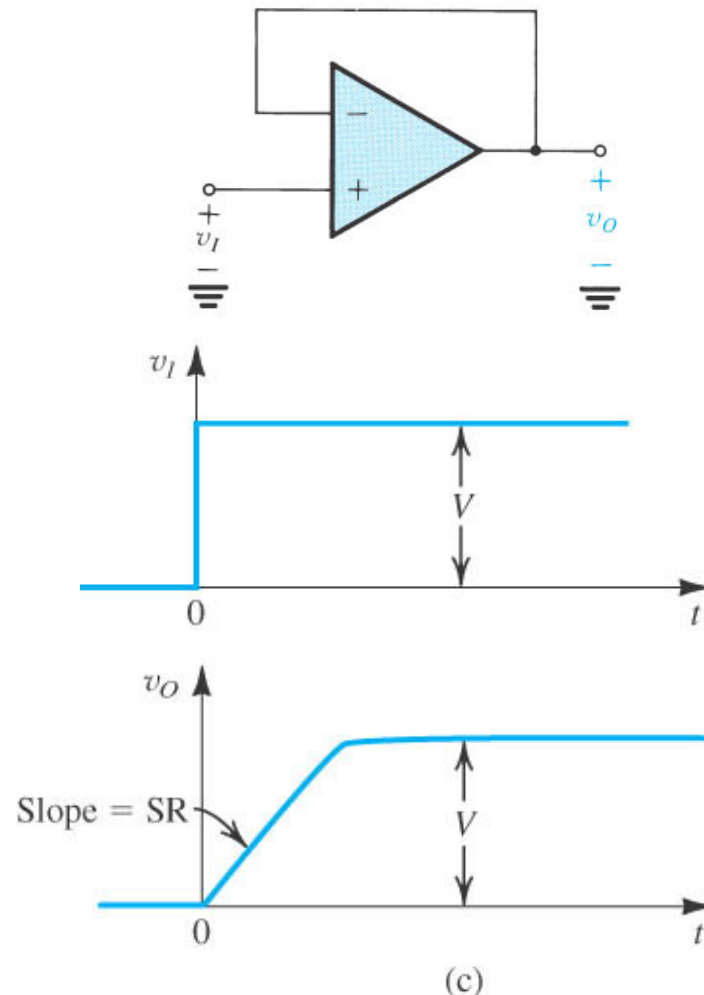
Maksimalna brzina odziva (*Slew rate*)

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

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

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

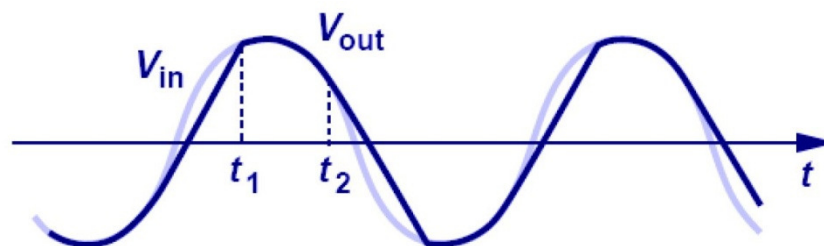
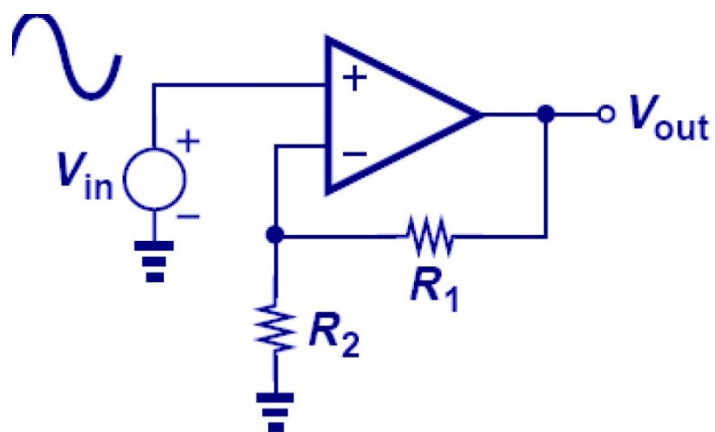
Posledica: Ukoliko je u bilo kom trenutku brzina promene signala veća od SR javiće se nelinearna Izobličenja.



Realni operacioni pojačavač

Maksimalna brzina odziva (*Slew rate*)

Ovaj nedostatak prouzrokuje nelinearna izobličenja signala kada su i amplituda i frekvencija signala toliko veliki da u pojedinim trenucima brzina promene signala prevazilazi po vrednosti Slew rate.

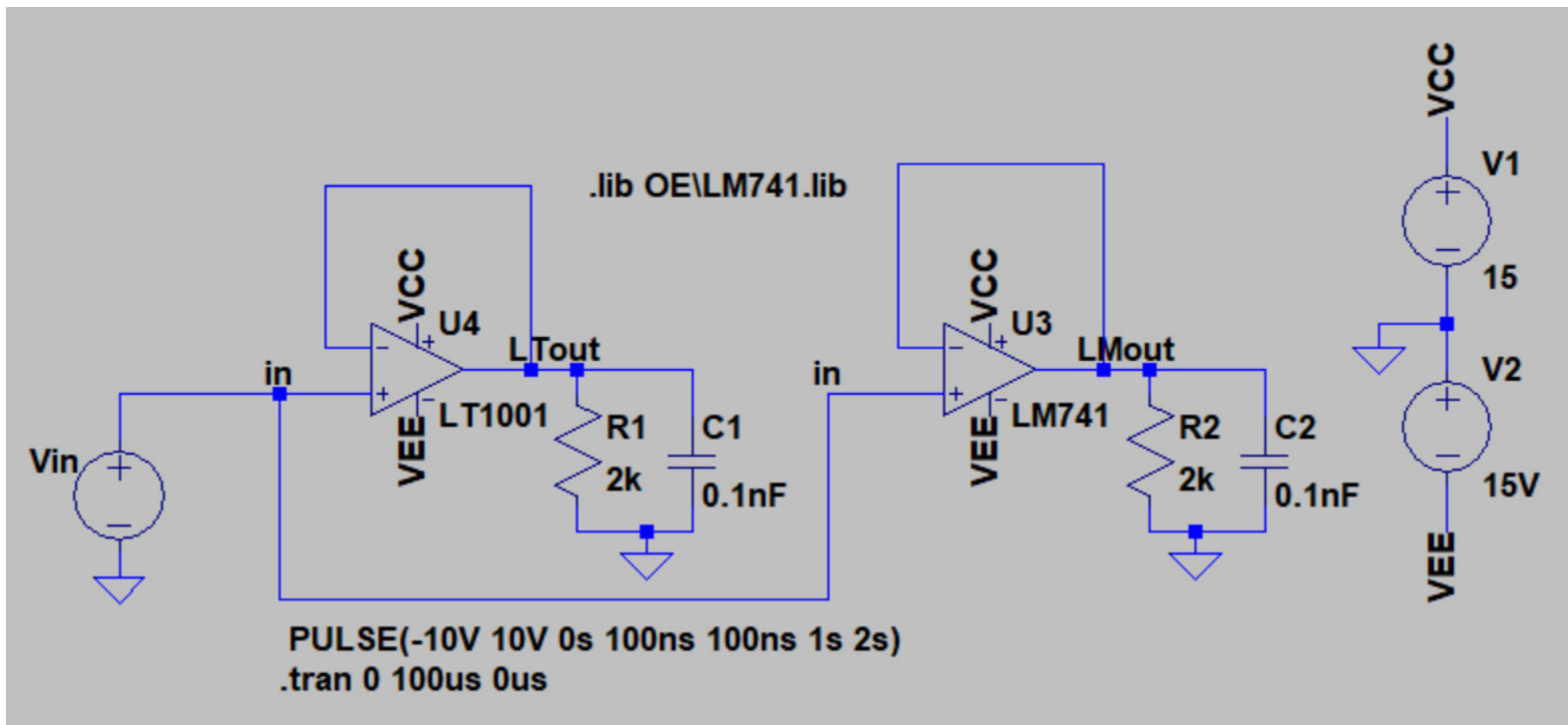


Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *slew rate*

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

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

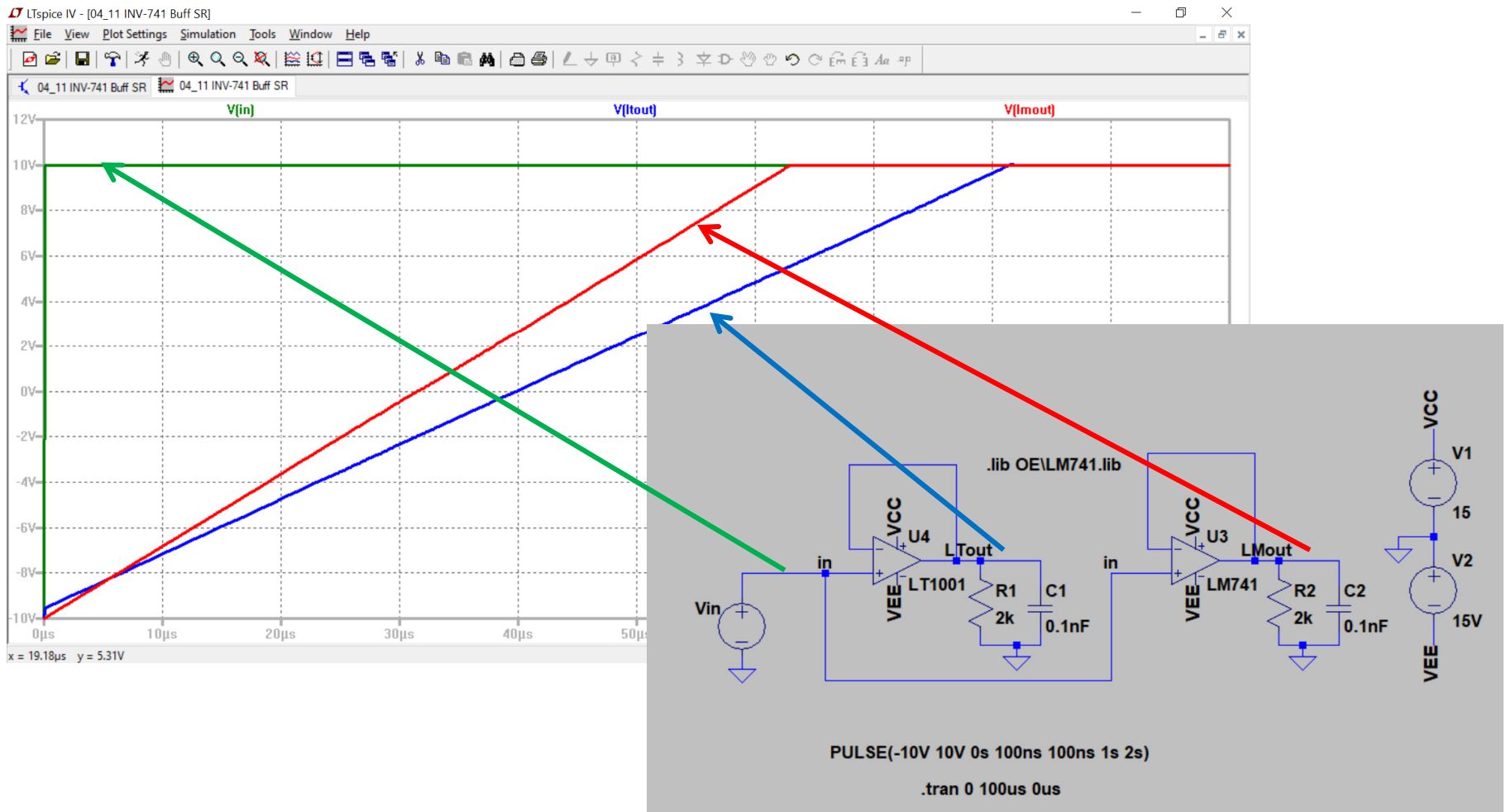


Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *slew rate*

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

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

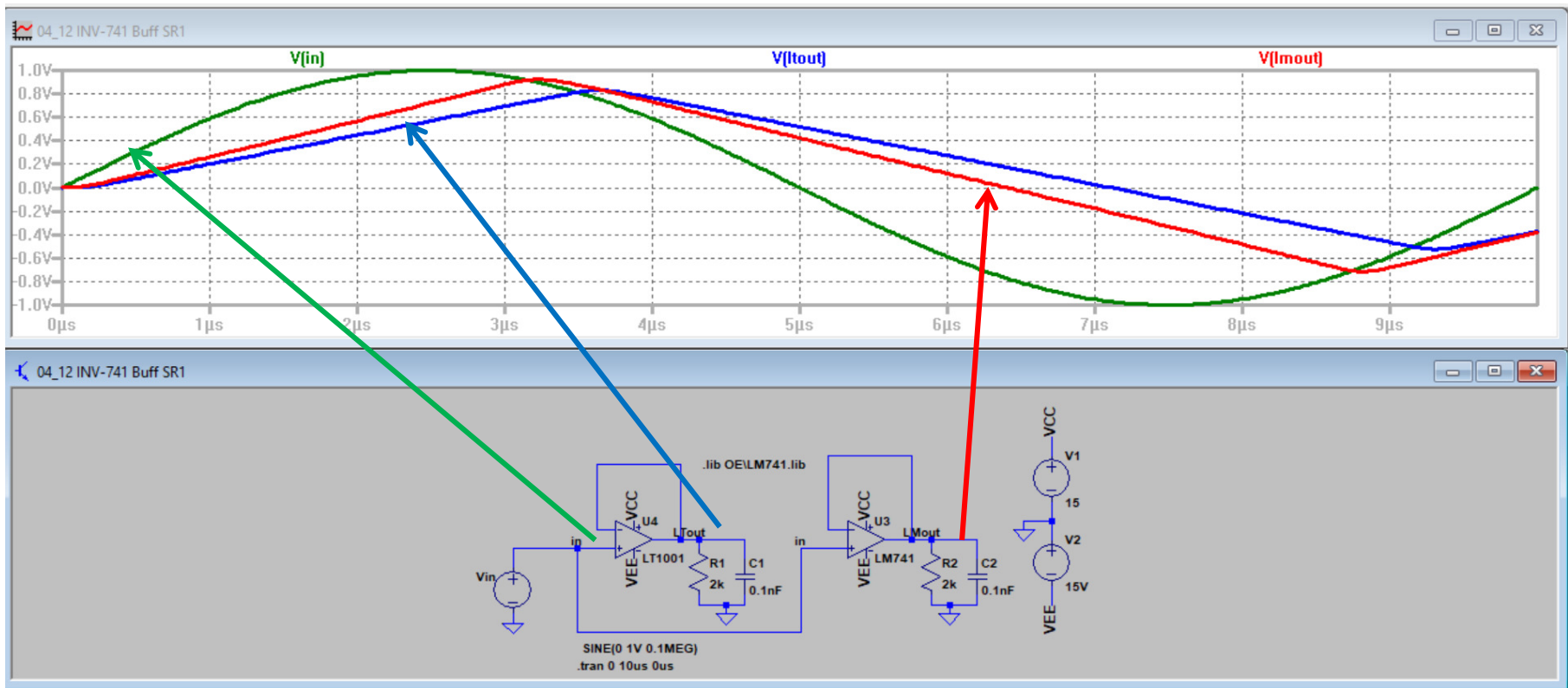


Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *slew rate*

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

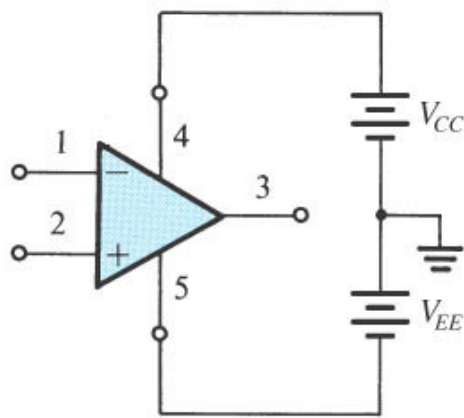
Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu



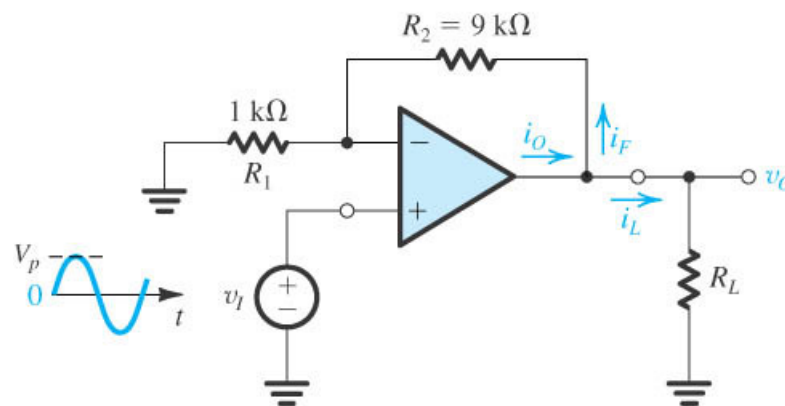
Realni operacioni pojačavač

Maksimalna vrednost napona na izlazu

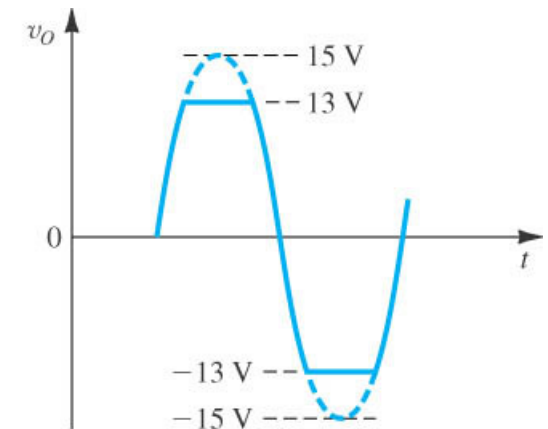
Napon na izlazu uvek je manji od pozitivnog i veći od negativnog napona napajanja. U kataloškim podacima navodi se maksimalna i minimalna vrednost napona na izlazu.



(b)



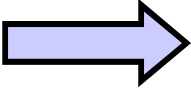
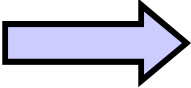
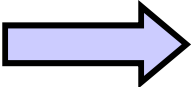

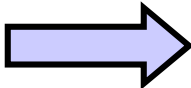
(a)



(b)

UPAMTITI i 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 <i>srednju vrednost</i> |  | $A_{cm} \neq 0$ |
| propusni opseg konačan |  | <i>realne f k-ke, uzan BW za otvorenu petlju</i> |

UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

2. Naponska razdešenost (*V offset*) $1\text{mV} < V_{OS} < 5\text{mV}$

3. Struja polarizacije (*I bias*) $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100\text{nA}$

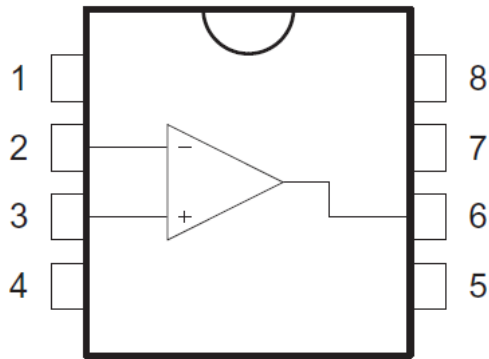
4. Strujna razdešenost (*I offset*) $I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \leq 10\text{nA}$

5. Potiskivanje napona napajanja $PSR = 20 \log \left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d} \right] \leq 90\text{dB}$

6. *Slew rate* $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1\text{V}/\mu\text{s}$

7. Naponsko zasićenje $\pm |V_{CC} - 2\text{V}|$

8. Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) $\sim \text{x}10\text{mA}$



N
DIP8
(Plastic Package)

- 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.

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 (T_j) is not exceeded.

Realni operacijski pojačavač

Kataložki podaci za

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
 $V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

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

Operacioni pojačavač

Elementarna pitanja

1. Model idealnog operacionog pojačavača, struktura operacionog pojačavača.
2. Karakteristike idealnog operacionog pojačavača.
3. Prenosna karakteristika idealnog i realnog operacionog pojačavača, posledica beskonačnog pojačanja idealnog operacionog pojačavača.

Ostala ispitna pitanja

4. Kolo za diferenciranje/integraljenje (električna šema, prenosna karakteristika u s domenu).
5. Balansni diferencijalni pojačavač.
6. Instrumentacioni pojačavač.
7. Logaritamski pojačavač i eksponencijalni pojačavač.
8. Frekvencijska karakteristika operacionog pojačavača u otrovenoj petlji (frekvencija jedničnog pojačanja, GBW).
9. Naponska razdešenost operacionog pojačavača (PSRR, CMRR, temperaturni drift).
10. Slew-rate.