Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:		U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)		10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe		10%	10%
Kolokvijum I	(poslednja nedelja u novembru)	50%	20%
Kolokvijum II	(poslednja nedelja predavanja)	50%	20%
		120%	60%



Savet: Lakše preko kolokvijuma

Sadržaj

1. Operacioni pojačavači
   a. Idealni operacioni pojačavači
   b. Polarizacija
   c. Modeli
   d. Primena
   e. Realni operacioni pojačavači

Operacioni pojačavači

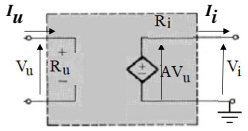


Zašto "Operacioni"?

Da se podsetimo

Operacioni pojačavač po karakteristikama liči na idelani naponski pojačavač

Naponski



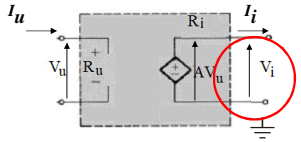
$$\mathbf{A} = \left.\frac{V_i}{V_u}\right|_{I_u=0} \quad \mathbf{[V/V]}$$

Idealni

$R_u = \infty$ $R_i = \mathbf{0}$ $\mathbf{A} \to \infty$ **!!!**

Idealni operacioni pojačavač

Naponski **Idealni**

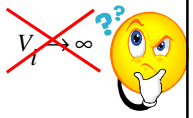


$$A = \left.\frac{V_i}{V_u}\right|_{I_{ul}=0} \quad [V/V]$$

$$R_u = \infty \qquad R_i = 0$$

$$A \to \infty$$

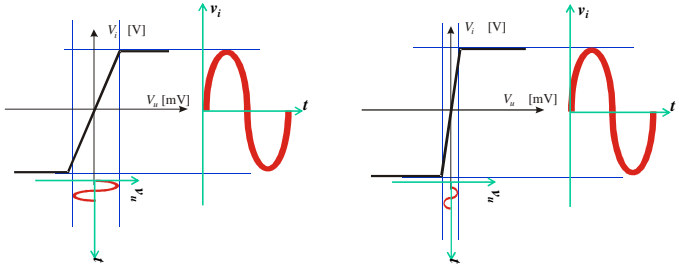
beskonačno pojačanje !!! $A = \frac{V_i}{V_u} \to \infty \Rightarrow V_i \to \infty$



$$V_u = 0$$

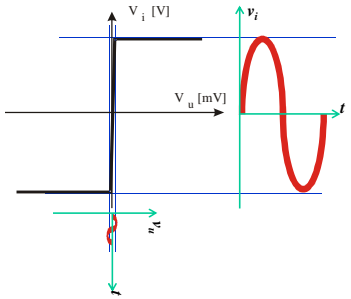
Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika



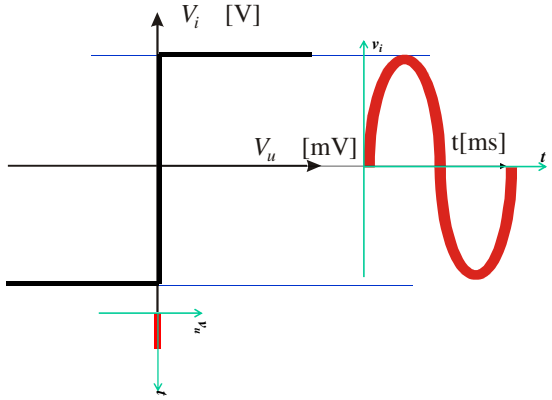
Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika



Idealni operacioni pojačavač

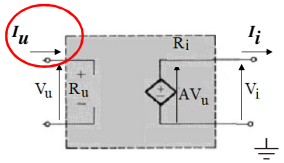
Idealna prenosna karakteristika



da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač

Naponski — **Idealni**



$$\mathbf{A} = \left.\frac{V_i}{V_u}\right|_{I_u=0} \quad [\mathbf{V/V}]$$

$R_u = \infty$, $R_i = \mathbf{0}$, $\mathbf{A} \to \infty$

$$R_u \to \infty \Rightarrow I_u = \mathbf{0\ A}$$

Pojačavači koji imaju beskonačnu ulaznu otpornost:

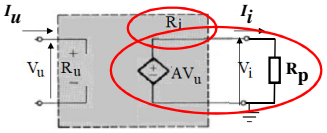
Ne slabe ulazni signal: $R_u/(R_g+R_u)=1$

Ne *opterećuju* prethodni stepen!!!

da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač

Naponski — **Pojačavači koji imaju izlaznu otpornost jednaku nuli** — **Idealni**



$$\mathbf{A} = \left.\frac{V_i}{V_u}\right|_{I_u=0} \quad [\mathbf{V/V}]$$

$R_u = \infty$, $R_i = \mathbf{0}$, $\mathbf{A} \to \infty$

$$R_i = \mathbf{0} \Rightarrow V_i = \frac{R_p}{R_i + R_p} V_o = V_o = \mathbf{A}V_u$$

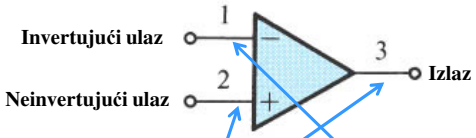
$$V_i \neq f(\mathbf{R}_p)$$

Pojačavači koji imaju nultu izlaznu otpornost:

Izlazni napon ne zavisi od otpornosti potrošača!!!

Idealni operacioni pojačavač

Simbol operacionog pojačavača



Dva ulazna priključka
neinvertujući "+"
i invertujući "–" ulaz

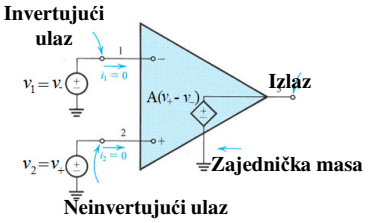
Jedan izlazni priključak

Šta operacioni pojačavač pojačava kad ima dva ulaza?



Idealni operacioni pojačavač

Treba da pojačava
razliku signala
na neinvertujućem "+" i invertujućem "–" ulazu

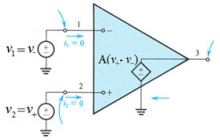


$$v_u = v_d = v_+ - v_-$$

$$A = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \to \infty \Rightarrow v_+ - v_- = 0 \Rightarrow \boxed{v_+ = v_-}$$

Idealni operacioni pojačavač

Ne želimo da pojačava zajednički potencijal - *srednju vrednost signala* na neinvertujućem (+) i invertujućem(-) ulazu



Značenje:

$$v_{ucm} = \frac{1}{2}(v_+ + v_-)$$

Ukoliko se signali v_2 i v_1 sastoje od DC komponente V_0 i fazno obrnutih prostoperiodičnih signala:

$$v_1 = v_- = V_0 - V_u \sin(\omega t); \qquad v_2 = v_+ = V_0 + V_u \sin(\omega t)$$

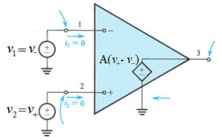
$$v_{ucm} = \frac{1}{2}(v_+ + v_-) = V_0; \; v_{ud} = v_+ - v_- = 2V_u \sin(\omega t)$$

Želimo samo pojačanje razlike signala na izlazu (šumovi)

Idealni operacioni pojačavač

Značenje:

Na izlazu ne želimo DC komponentu niti signale koji su isti na oba ulaza



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

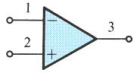
a razlika signala mora maksimalno da se pojača

$$A = A_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \Rightarrow v_+ - v_- = 0 \qquad v_+ = v_-$$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR

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

Idealni operacioni pojačavač



$$A = \left.\frac{v_i}{v_u}\right|_{I_u=0} \quad [\text{V/V}]$$

$$R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

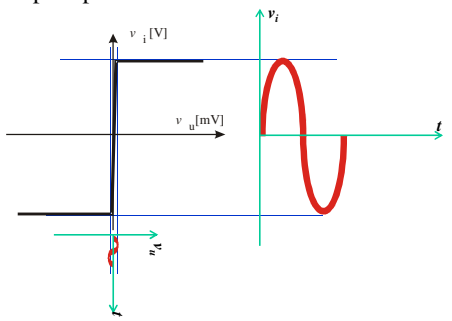
$$A_{cm} = 0$$

Idealne operacione pojačavače karakterišu

- **beskonačno pojačanje razlike** ⇒ $v_u = 0 \rightarrow v_+ = v_-$
- **beskonačna ulazna otpornost** ⇒ $i_u = 0$
- **izlazna otpornost jednaka nuli** ⇒ $v_i \neq f(R_p)$
- **ne pojačava *srednju vrednost*** ⇒ $A_{cm} = 0$
- **beskonačni propusni opseg** ⇒ ***idealne f k-ke***

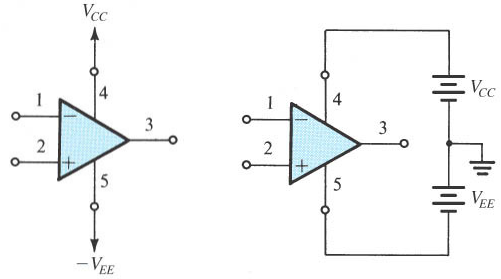
Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



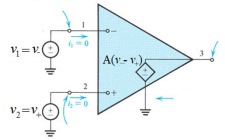
Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



Idealni operacioni pojačavač

Primena OpAmp-a



Kako koristiti pojačavač
sa beskonačnim pojačanjem?

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

(biće više reči u nastavku kursa)

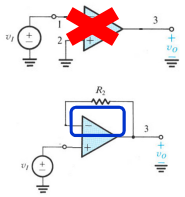
Zato se pojačanje *OpAmp*a (o kome smo do sada govorili) naziva

***pojačanje u otvorenoj petlji* (*Open 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

Prieri primene OpAmp-a

S obzirom da je pojačanje samog pojačavača u „otvorenoj petlji“ poznato ($A_0 \to \infty$), od interesa je da se nađe pojačanje *u zatvorenoj petlji (ZP),* odnosno $A=V_i/V_g$, gde je V_g napon pobudnog generatora.

Ključni podatak:

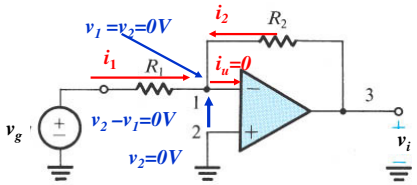
Razlika napona između v_+-v_-=0, odnosno $v_+ = v_-$

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač –*

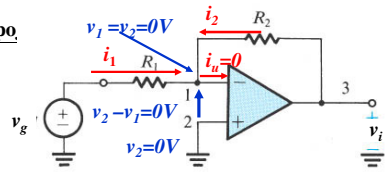
izlazni signal suprotne faze od ulaznog

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



Idealni operacioni po

Invertorski pojačavač



$i_u=i_1+i_2=0A \Rightarrow i_1=-i_2$

$$i_1=\frac{v_g-v_1}{R_1}=\frac{v_g}{R_1} \quad (v_1=0V)$$

$$i_2=\frac{v_i-v_1}{R_2}=\frac{v_i}{R_2} \quad (v_1=0V)$$

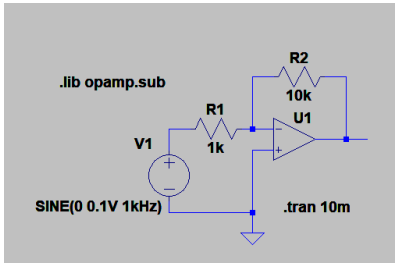
$$\Rightarrow \frac{v_i}{R_2}=-\frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_i=-\frac{R_2}{R_1}v_g$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

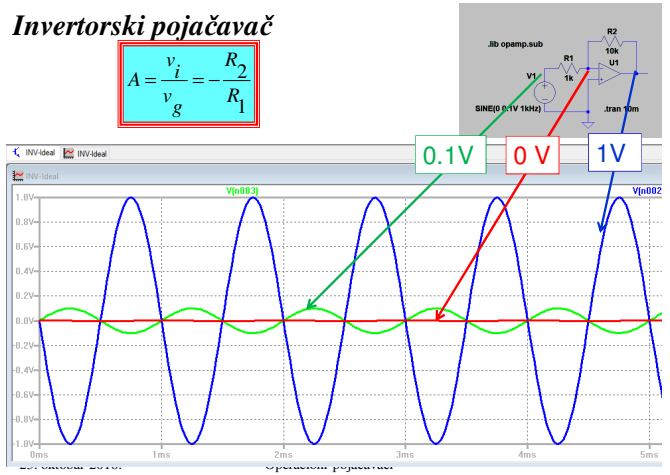
$$A=\frac{v_i}{v_g}=-\frac{R_2}{R_1}$$



Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

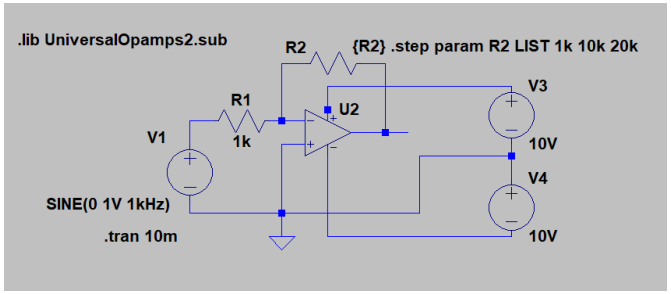
$$A=\frac{v_i}{v_g}=-\frac{R_2}{R_1}$$



Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

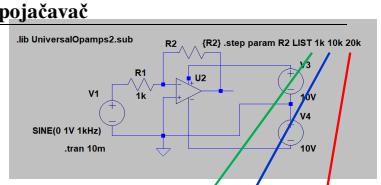
$$A = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$

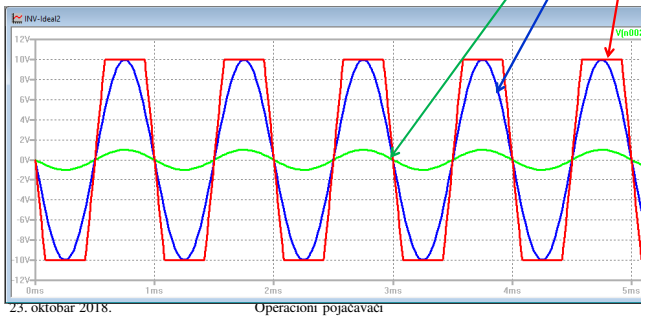


Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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





Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

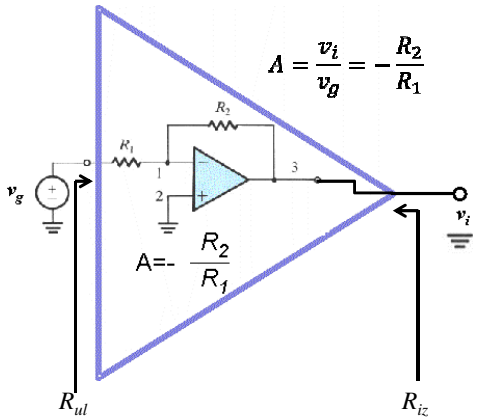
osobine

Naponsko pojačanje

Ulazna otpornost

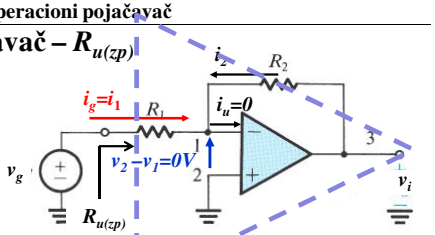
Izlazna otpornost

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



Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{u(zp)}$



$$R_{u(zp)} = \frac{v_g}{i_g} = ?$$

$i_g = i_1$

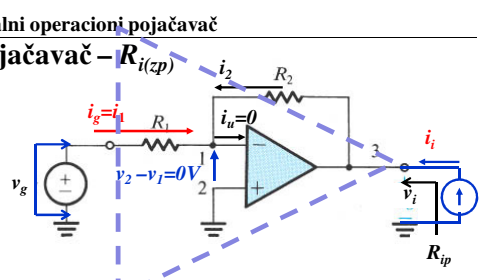
$$i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1} \quad (v_1 = 0V)$$

$$\Rightarrow R_{u(zp)} = \frac{v_g}{i_g} = R_1$$

Ako se zahteva veliko $R_{u(zp)}$, R_1 mora da bude veliko!

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

Invertorski pojačavač – $R_{i(zp)}$



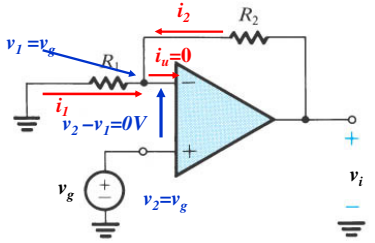
$$R_{i(zp)} = R_{i(op)} \Big| R_2 = R_i = 0\Omega$$

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

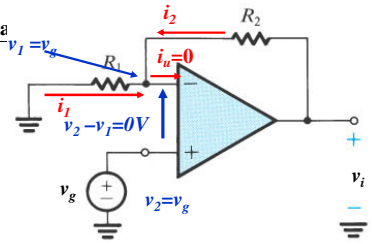
Neinvertorski pojačavač –

izlazni signal je u fazi sa ulaznim

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



Neinvertorski pojačavač



$i_u=i_1+i_2=0A \Rightarrow i_1=-i_2$

$$i_1=\frac{0-v_g}{R_1}=-\frac{v_g}{R_1}$$

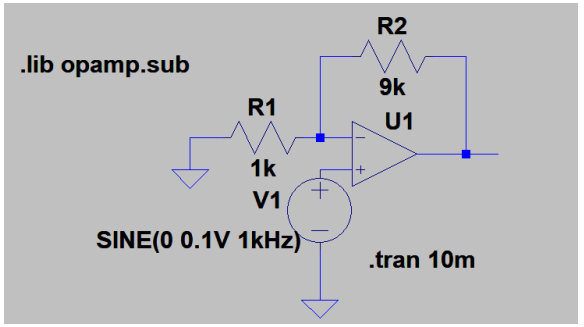
$$i_2=\frac{v_i-v_g}{R_2}$$

$$\frac{v_i-v_g}{R_2}=\frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_i=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)v_g$$

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

Neinvertorski pojačavač

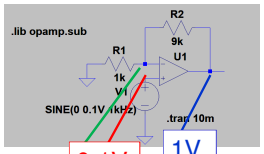
$$A=\frac{v_i}{v_g}=\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$

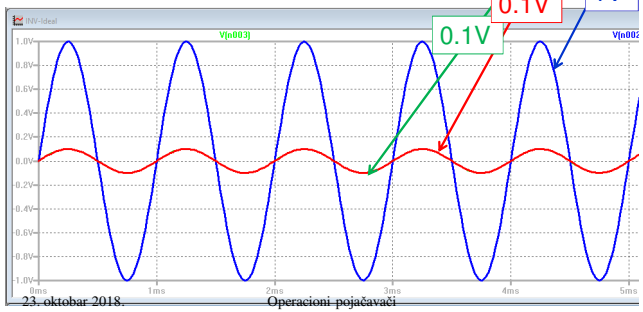


Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

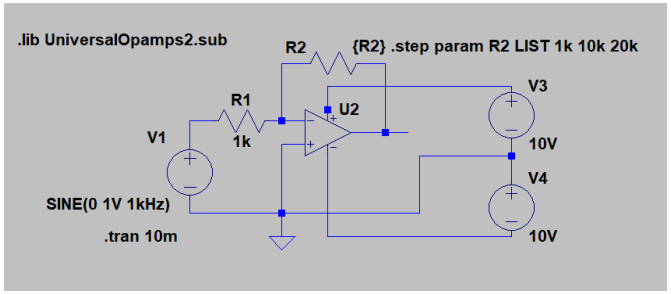




Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

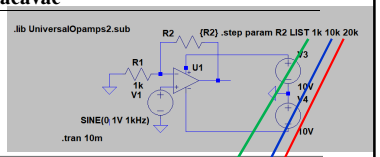
$$A = \frac{v_i}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

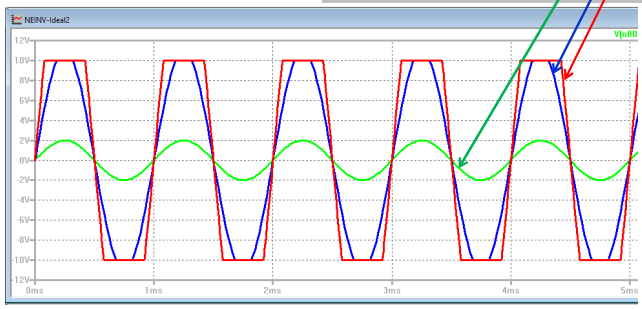


Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

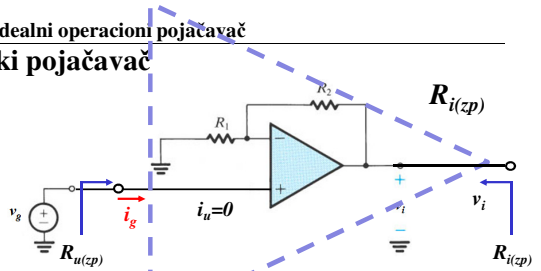




Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

$R_{u(zp)}$ $R_{i(zp)}$



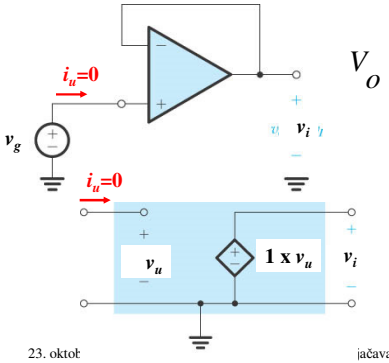
$i_g = i_u = 0$

$$R_{u(zp)} = \frac{v_g}{i_g} \to \infty$$

$$R_{i(zp)} = R_{i(op)} \,\big|\, R_2 = R_i = 0\Omega$$

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



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

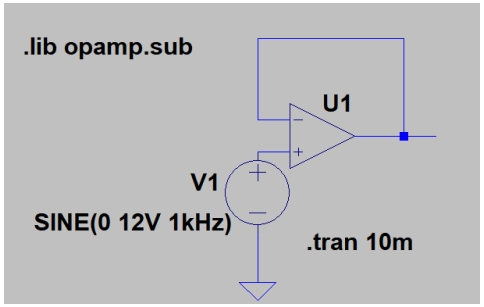
$$R_{u(zp)} \to \infty;$$

$$R_{i(zp)} = 0$$

(b)

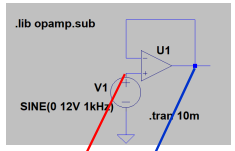
Idealni operacioni pojačavač

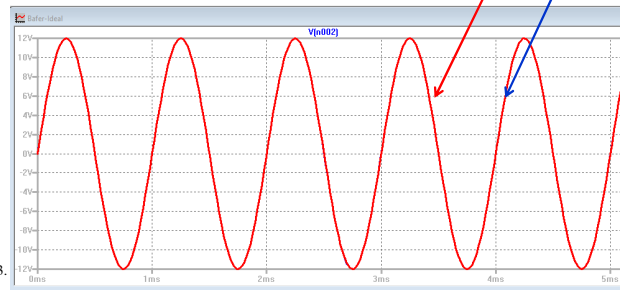
Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



Idealni operacioni pojačavač

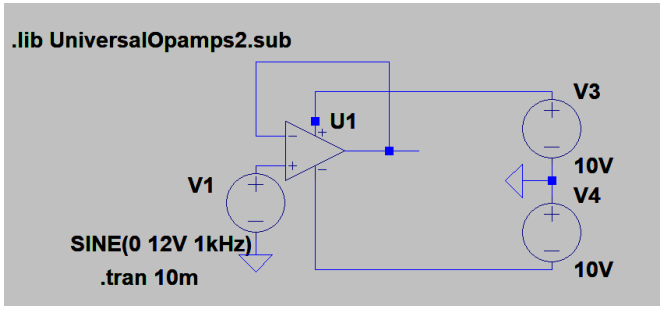
Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)





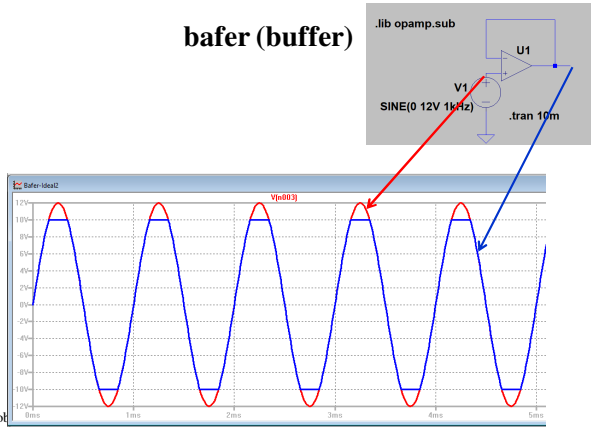
Idealni operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



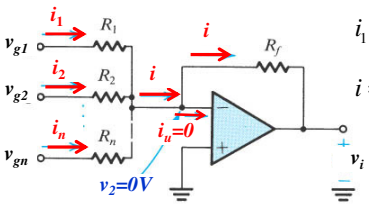
Idealni operacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



Idealni operacioni pojačavač

Kolo za sabiranje – Weighted Summer



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

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

$$v_i = 0 - iR_f$$

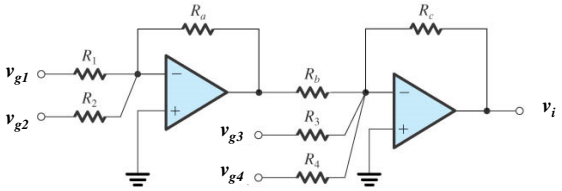
$$v_i = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_{g1} + \frac{R_f}{R_2}v_{g2} + \ldots + \frac{R_f}{R_n}v_{gn}\right)$$

Idealni operacioni pojačavač

Domaći 4.1



Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike

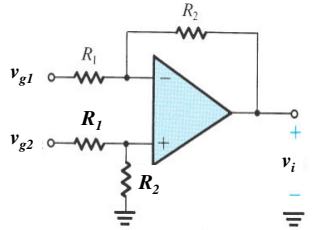


$$v_i = \frac{R_a}{R_1}\frac{R_c}{R_b}v_{g1} + \frac{R_a}{R_2}\frac{R_c}{R_b}v_{g2} - \frac{R_c}{R_3}v_{g3} - \frac{R_c}{R_4}v_{g4}$$

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kolo za „oduzimanje“ – pojačavač razlike signala na generatorima



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

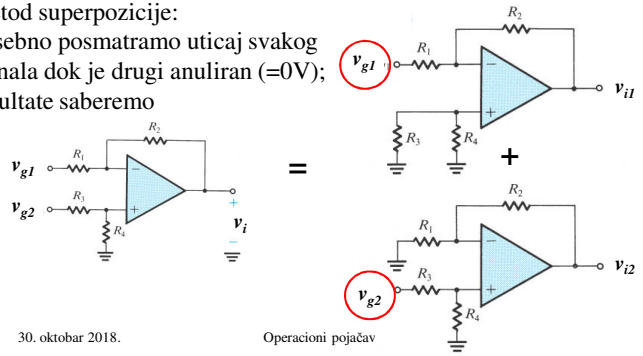
Četvrta nedelja

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – pojačavač razlike

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

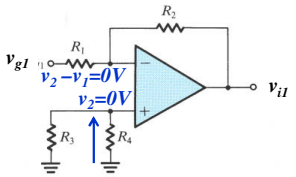
Metod superpozicije:
Posebno posmatramo uticaj svakog signala dok je drugi anuliran (=0V); rezultate saberemo

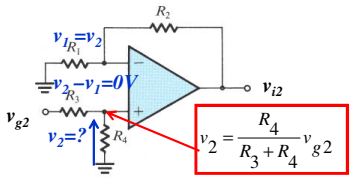


Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

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





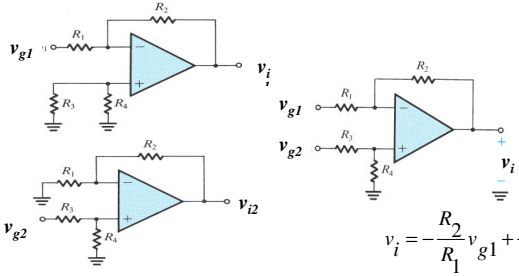
$$v_{i1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{g1}$$

$$v_{i2} = (1+\frac{R_2}{R_1})v_2 = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right) v_{g2}$$

$$v_{i2} = \frac{R_1+R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3+R_4} v_{g2} = \frac{R_4}{R_1} \cdot \frac{R_1+R_2}{R_3+R_4} v_{g2}$$

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač



$$v_i = v_{i1} + v_{i2}$$

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

za $\{R_3 = R_1 \text{ i } R_4 = R_2\}$

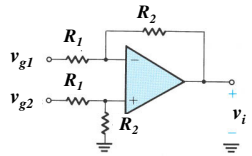
$$v_i = -\frac{R_2}{R_1} v_{g1} + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_1+R_2}{R_1+R_2} v_{g2}$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač –

Diferencijalno pojačanje u zatvorenoj petlji



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

Za one koji žele da nauče više

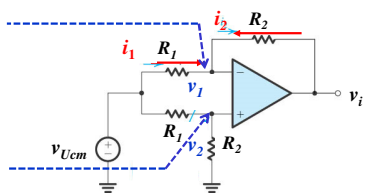
Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – A_{cm} u zatvorenoj petlji

$$v_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm}$$

$$v_1 = v_2$$

$$v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm}$$



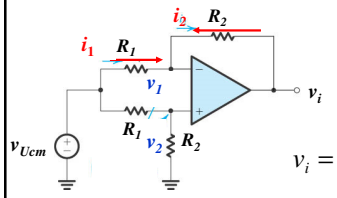
$$i_1 = \frac{1}{R_1}\left[v_{Ucm} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm}\right] = \frac{1}{R_1 + R_2} v_{Ucm} = -i_2$$

$$v_i = v_1 + i_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} + i_2 R_2$$

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – A_{cm} u zatvorenoj petlji



$$v_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} - i_1 R_2$$

$$v_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} - \left(\frac{1}{R_1 + R_2} v_{Ucm}\right) \cdot R_2 = 0$$

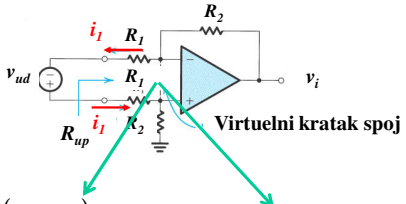
$$v_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} = 0$$

$$A_{cm} = \frac{v_i}{v_{Ucm}} = 0$$

Za one koji žele da nauče više

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_u, R_1 mora da bude veliko!

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

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Postoje primene u kojima se zahteva veliko R_u pojačavača kako se signal ne bi oslabio.

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

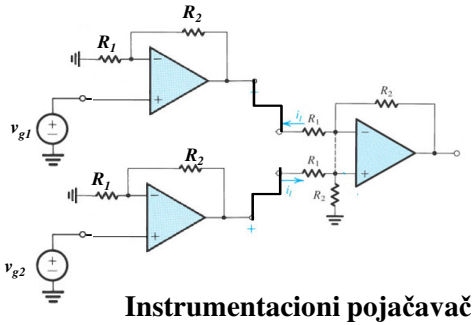
Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



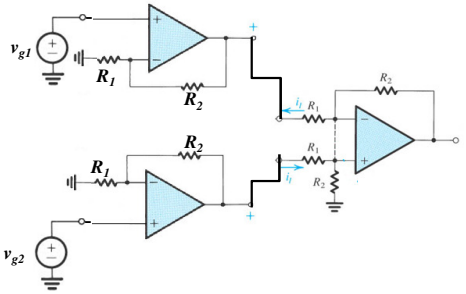


Instrumentacioni pojačavač

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

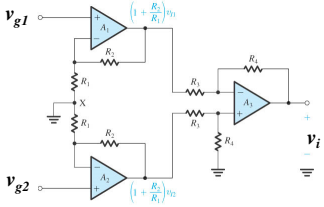
Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?





Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač



Neinvertujući pojačavači kao baferi sa $A=(1+R_2/R_1)$.

Povećano pojačanje i ulazna otpornost.

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

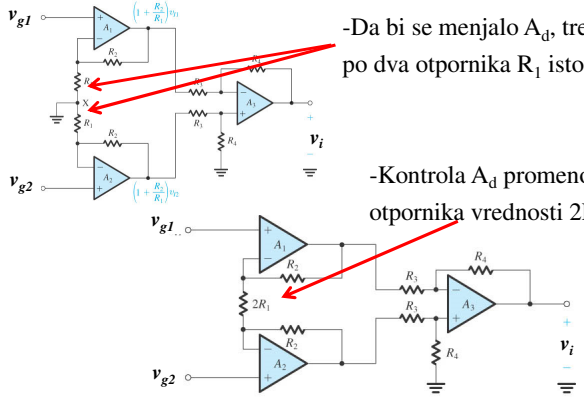
-A_1 i A_2 moraju da budu savršeno upareni ☹

-Da bi se menjalo A_d, treba menjati po dva otpornika R_n istovremeno ☹

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač

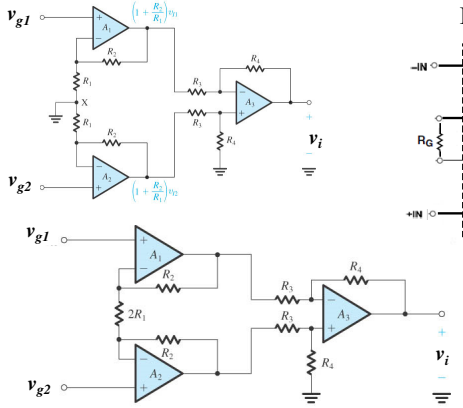


-Da bi se menjalo A_d, treba menjati po dva otpornika R_1 istovremeno

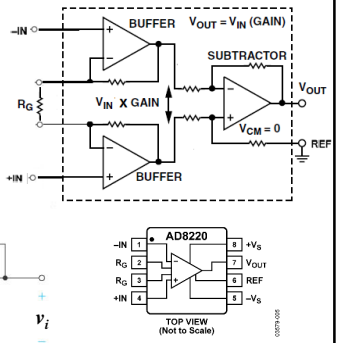
-Kontrola A_d promenom jednog otpornika vrednosti $2R_1$

Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač



Integrisano kolo



Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač

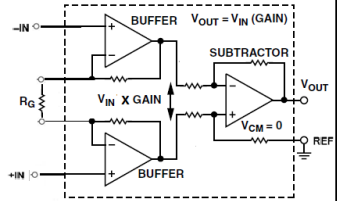
NIJE isto što i operacioni!

Iako ima diferencijalni ulaz -IN i +IN,
ima beskonačnu ulaznu R
izlazna otpornost mala,
NEMA BESKONAČNO POJAČANJE RAZLIKE SIGNALA

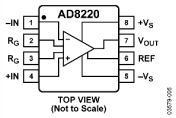
$V_{OUT} – V_{REF} = G(V_{IN+} – V_{IN–})$

$G = (49.4k\Omega / R_G) + 1$

Integrisano kolo





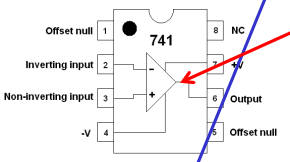


Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač

NIJE isto što i operacioni!

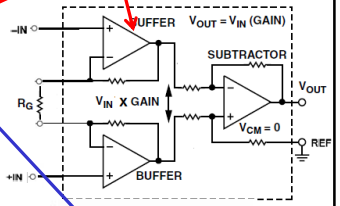
IAKO ISTO IZGLEDAJU U RADNJI!



OPERACIONI



Integrisano kolo



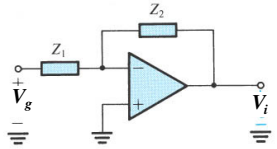
Instrumentacioni



Idealni operacioni pojačavač

Invertujući pojačavač sa impedansama –

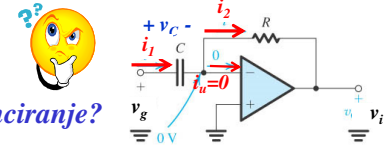
A(s)* u *zatvorenoj petlji (ZP)



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

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje – f karakteristika



diferenciranje?

(a)

$$i_1 = \frac{(v_g - 0)}{Z_C} = \frac{v_g}{1/j\omega C} = sC \cdot v_g$$

$$i_2 = \frac{0 - v_i}{R} = -\frac{v_i}{R}$$

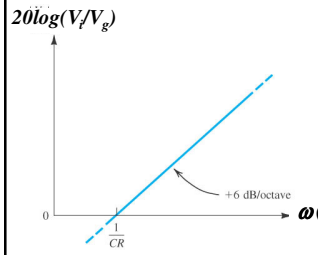
$$i_1 = i_2$$

$$sCv_g = -\frac{v_i}{R} \Rightarrow v_i = -s \cdot R \cdot C \cdot v_g$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje – f karakteristika



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

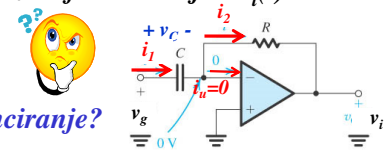
$$|A(s)| = \omega RC$$

$$\varphi = arctg\left[\frac{\mathrm{Im}\{A(s)\}}{\mathrm{Re}\{A(s)\}}\right] = -arctg\left[\frac{\omega RC}{0}\right] = -\pi/2$$

Ponaša se kao VF filtar sa graničnom frekvencijom u beskonačnosti

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



diferenciranje?

(a)

$$i_1(t) = C\frac{dv_C(t)}{dt} = C\frac{d(v_g(t) - 0)}{dt}$$

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

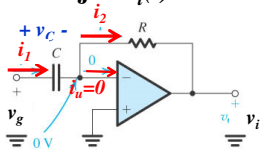
$$i_2(t) = \frac{0 - v_i(t)}{R}$$

$$i_1(t) = i_2(t)$$

$$C\frac{dv_g(t)}{dt} = -\frac{v_i(t)}{R} \Rightarrow v_i(t) = -RC\frac{dv_g(t)}{dt}$$

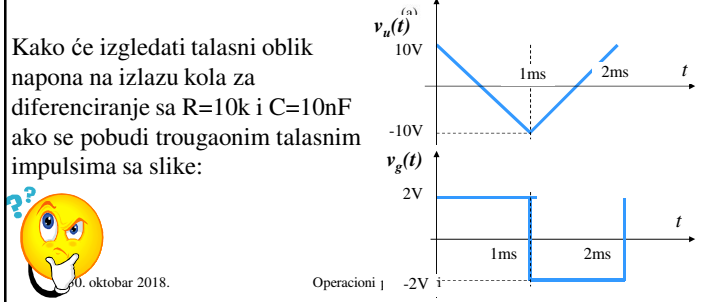
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



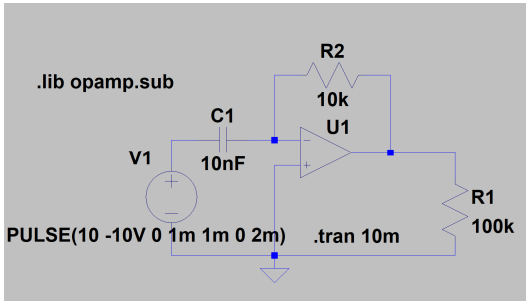
$$v_i = -RC\frac{dv_g}{dt}$$

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:



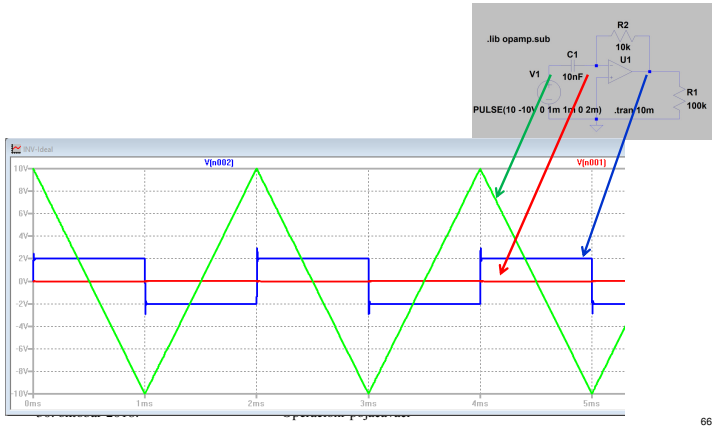
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



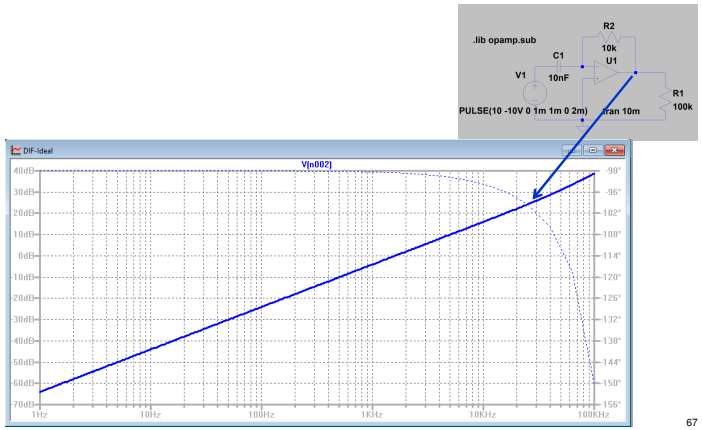
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje

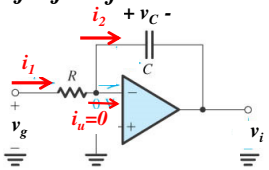


Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika



integraljenje?



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

$$i_2 = \frac{0 - v_i}{Z_C} = -\frac{v_i}{1/j\omega C} = -j\omega C v_i = -sCv_i$$

$$i_1 = i_2$$

$$\left.\begin{array}{l} \frac{v_g}{R} = -sCv_i \end{array}\right\} \Rightarrow v_i = -\frac{1}{RCs} v_g$$

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

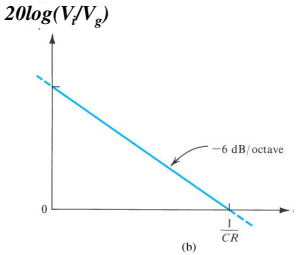
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika

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

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

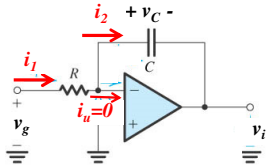
$$\varphi = arctg\left[\frac{\mathrm{Im}\{A(s)\}}{\mathrm{Re}\{A(s)\}}\right] = arctg\left[\frac{1/\omega RC}{0}\right] = \pi/2$$



Ponaša se kao NF filtar sa graničnom frekvencijom u nuli

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - $v_i(t)$



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

$$i_2(t) = C\frac{dv_C(t)}{dt} = C\frac{d(0 - v_i(t))}{dt}$$

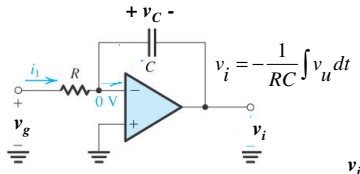
$$i_2(t) = -C\frac{dv_i(t)}{dt}$$

$$i_1(t) = i_2(t)$$

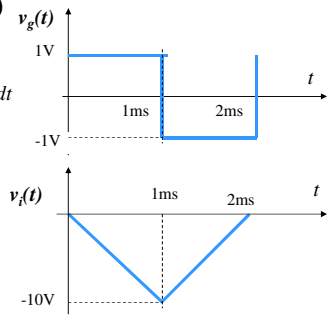
$$\frac{v_g(t)}{R} = -C\frac{dv_i(t)}{dt} \Rightarrow v_i(t) = -\frac{1}{RC}\int v_g(t)dt$$

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - $v_i(t)$



$$v_i = -\frac{1}{RC}\int v_u\,dt$$



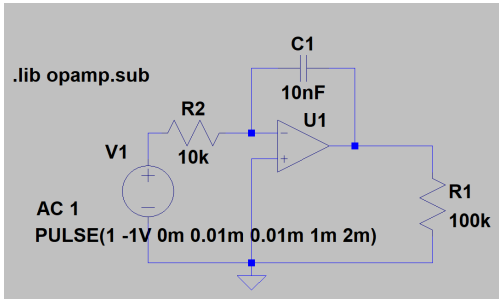
R=10k

C=10**nF**

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

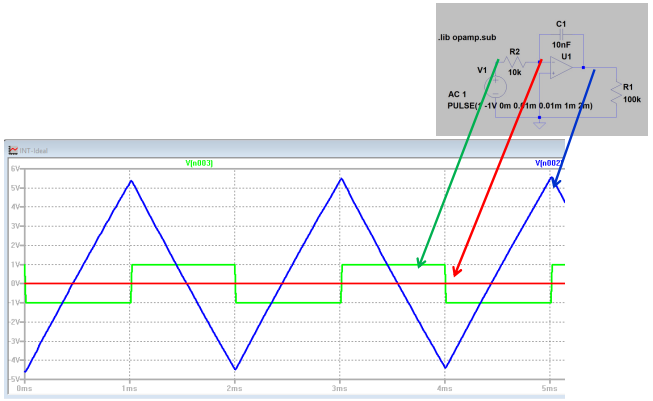
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje



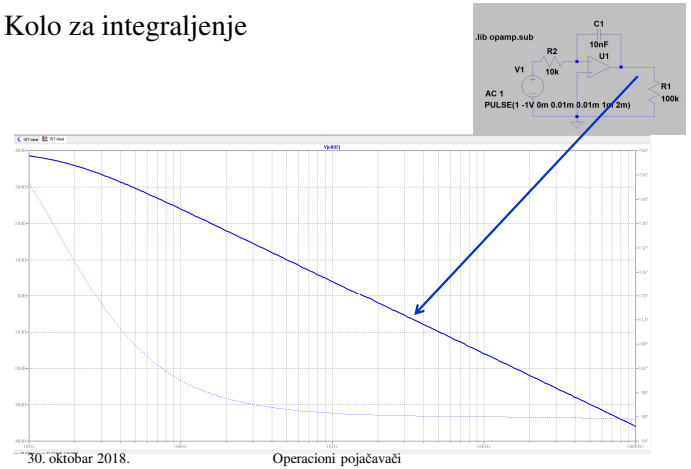
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje



Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje

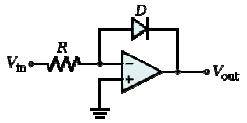


Zašto "Operacioni"?

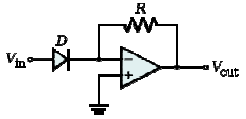


Mogu da se koriste za različite računske OPERACIJE

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



- **Antilogaritmovanje**
- **Množenje**
- **Deljenje**



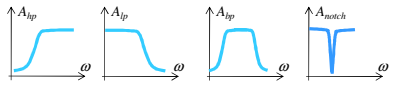
Za one koji žele da nauče više

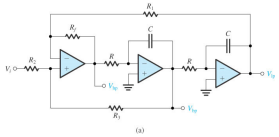
Idealni operacioni pojačavač

Pored toga

Mogu da se koriste za različite druge korisne primene

- **Aktivni filtri**

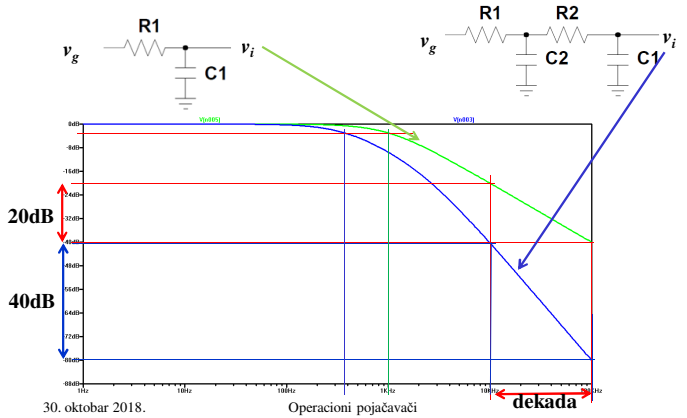




- Komparatori
- Precizni usmerači
- Oscilatori (biće obrađeni kasnije u okviru kursa)

Za one koji žele da nauče više

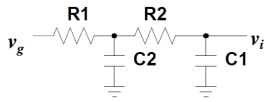
Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)



Za one koji žele da nauče više

Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)

***red filtra definiše stepen *s* u imeniocu prenosne funkcije (broj reaktivnih elemenata u kolu)**



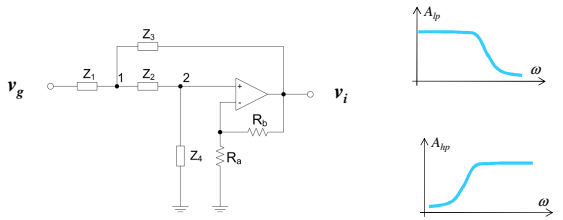
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{s^2(R_1C_1R_2C_2) + s(R_1C_2 + R_2C_1 + R_1C_1) + 1}$$

$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{\frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_2C_2}\right) + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}$$

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

***Aktivni filtri* –** (Sallen-Key konfiguracija)



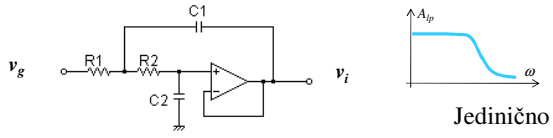
http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php

http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

***Aktivni filtri* –** (Sallen-Key Low Pass konfiguracija) NF



Jedinično pojačanje:

$v_+ = v_- = v_i$

$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{\frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1}\right)s + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}$$

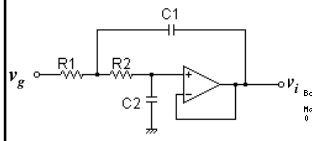
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{R_1C_1R_2C_2s^2 + (R_1C_2 + R_2C_2)s + 1}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$$

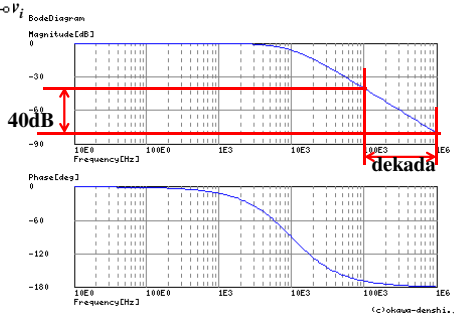
Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key LP konfiguracija) NF



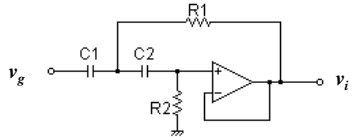
$R_1 = R_2 = 16\text{k}\Omega$
$C_1 = C_2 = 0.001\text{uF}$
$f_c = 10\text{kHz}$

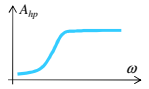


Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF





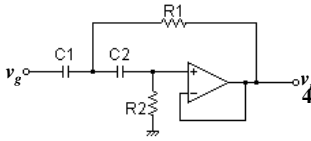
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{s^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_2C_2}\right)s + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$$

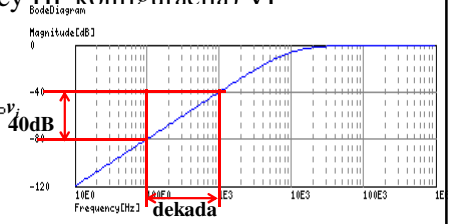
Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF



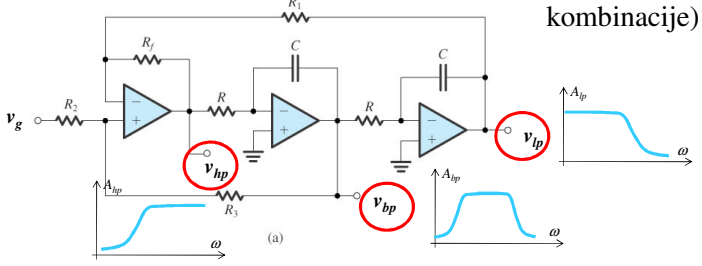
$R_1 = R_2 = 16\text{k}\Omega$
$C_1 = C_2 = 0.001\text{uF}$
$f_c = 10\text{kHz}$

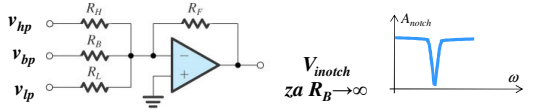


$$A(s) = \frac{s^2}{s^2+125000s+3906250000}$$

Idealni operacioni pojačavač

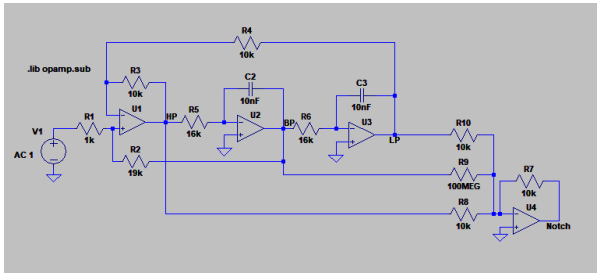
Aktivni filtri – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)





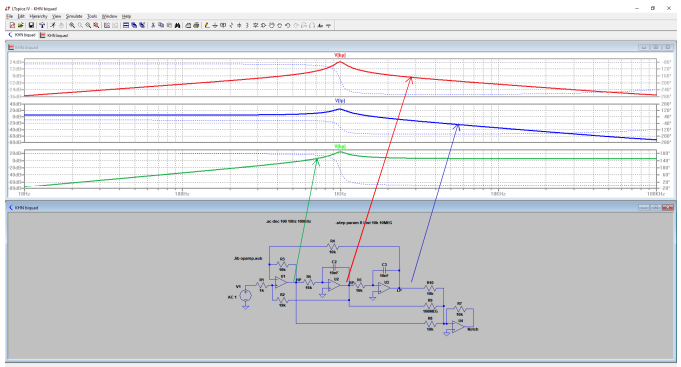
Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)



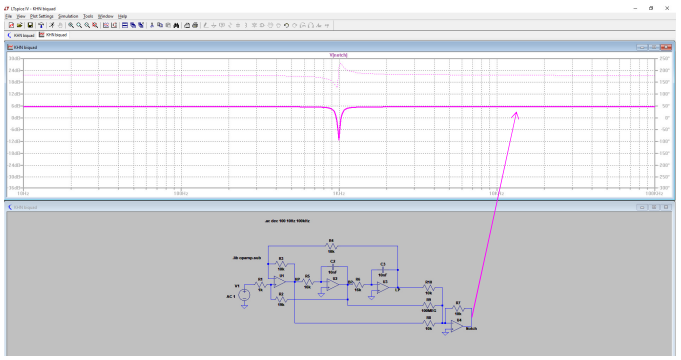
Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)



Idealni operacioni pojačavač

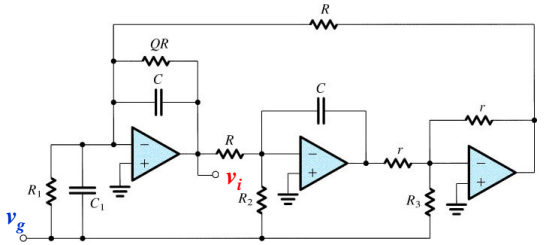
Aktivni filtri – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)



Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri



Zavisno od vrednosti elemenata mogu da se realizuju svi tipovi filtara drugog reda: LP, BP, HP, Notch, AP

Idealni operacioni pojačavač

Da se podsetimo:

idealne operacione pojačavače karakterišu

- **beskonačno pojačanje razlike** ⇒ $v_u=0 \rightarrow v_+=v_-$
- **beskonačna ulazna otpornost** ⇒ $i_u=0$
- **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

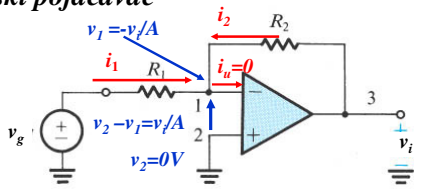
Realne operacione pojačavače karakterišu

- **pojačanje nije beskonačno** ⇒ $v_u=v_i/A$
- **ulazna otpornost konačna** ⇒ $i_u \neq 0$
- **izlazna otpornost konačna** ⇒ $v_i = f(R_p)$
- **pojačava *srednju vrednost*** ⇒ $A_{cm} \neq 0$
- **propusni opseg konačan** ⇒ ***realne f k-ke***

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog *pojačanja*

Invertorski pojačavač



$i_u=i_1+i_2=0A \Rightarrow i_1=-i_2$

$$i_1=\frac{v_g-v_1}{R_1}=\frac{v_g-(-v_i/A)}{R_1}$$

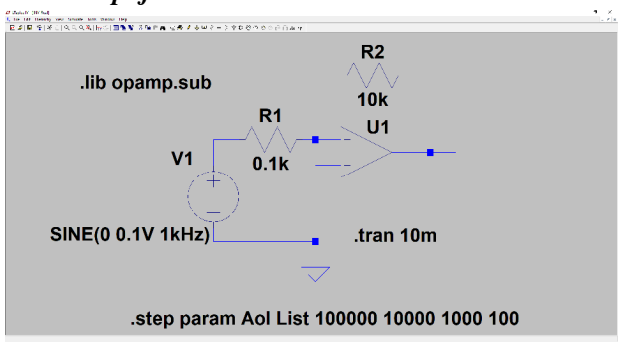
$$i_2=\frac{v_i-v_1}{R_2}=\frac{v_i-v_i/A}{R_2}$$

$$\Rightarrow A_r=\frac{v_i}{v_g}=\frac{-R_2/R_1}{1+(1+R_2/R_1)/A}$$

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog *pojačanja*

Invertorski pojačavač



Domaći 4.2

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)

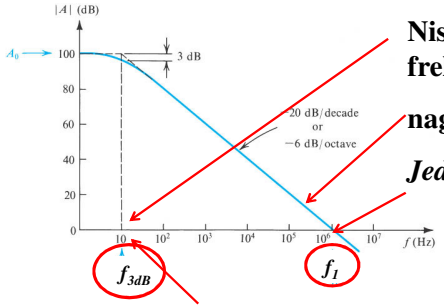
Efekti konačnog pojačanja Tema za razmišljanje

Zamenimo OpAmp koji ima A=10,000V/V (80dB) sa drugim koji ima pojačanje A=100,000V/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?

Efekti konačnog *propusnog opsega* (otvorena petlja)

Realna amplitudsta karakteristika (opamp 741)



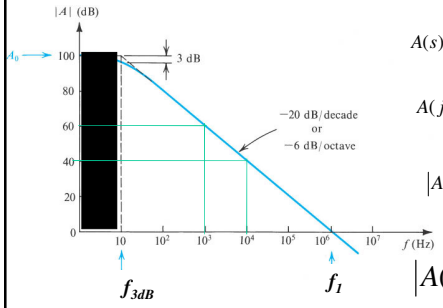
Niska "granična" frekvencija

nagib -20dB/dec

Jediničnо pojačanje

Jedan dominantan pol

Efekti konačnog *propusnog opsega* (otvorena petlja)



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

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

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

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

***f_1=ω_1/2π*, daje se u katalogu kao *Unity-Gain Bandwidth* ili *Gain Bandwidth Product* (GB)**

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_{3dB}} = \frac{1}{1/A_0 + s/(A_0\omega_{3dB})} = \frac{1}{1/A_0 + s/\omega_1}$$

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog *propusnog opsega* (zatvorena petlja)

Invertorski pojačavač

$$|A_r(s)| = \frac{V_i(s)}{V_g(s)} = \frac{-R_2/R_1}{1+(1+R_2/R_1)/A(s)}$$

$$A(s) = \frac{1}{1/A_0 + s/\omega_1}$$

$$\frac{V_i(s)}{V_g(s)} = \frac{-R_2/R_1}{1+\frac{1}{A_0}(1+R_2/R_1)+\frac{s}{\omega_1/(1+R_2/R_1)}} \approx \frac{-R_2/R_1}{1+\frac{s}{\omega_1/(1+R_2/R_1)}}$$

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

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

Realni operacioni pojačavač

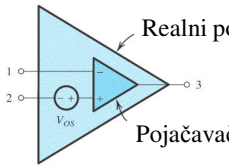
Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset*

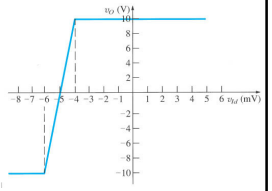
Ukoliko se ulazi u pojačavač kratkospoje i vežu za masu, a postoji napon na izlazu, to je posledica naponske razdešenosti.

Realno: 1mV<V_{OS}<5mV.

Zavisi od temperature μV/°C

Model:

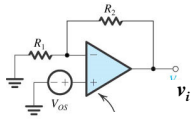




Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset*

Uticaj naponskog ofseta na invertujući i neinvertujući pojačavač je identičan:

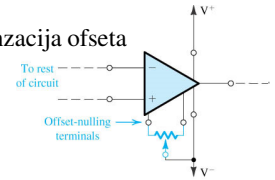


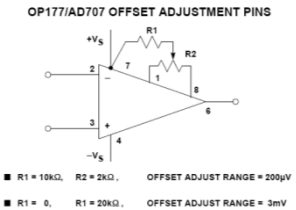
Pojačavač bez ofseta

$$V_I = V_{OS}\left[1+\frac{R_2}{R_1}\right]$$

(Manji za veće R_1)

Kompenzacija ofseta



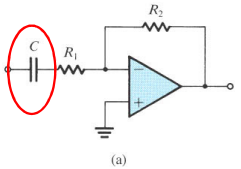


Realni operacioni pojačavač

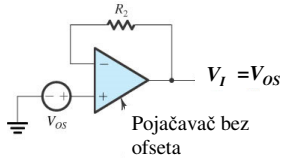
Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset*

Smanjenje uticaja ofseta kod invertujućeg pojačavača.

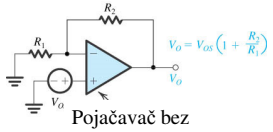
Primenljivo samo za VF signale



(a)



Sa C, na izlazu se javlja samo $V_I=V_{OS}$, a bez C, $(1+R_2/R_1)$ puta veći:



Pojačavač bez ofseta

$$V_I = V_{OS}\left[1+\frac{R_2}{R_1}\right]$$

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *struja polarizacije i strujni ofset (razdešenost)*

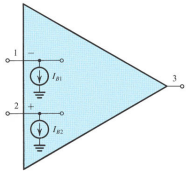
Da bi se polarizovali aktivni elementi (biće reči kasnije) u OpAmpu moraju da teku jednosmerne struje i u odsustvu ulaznih signala (I_u nije nula!).

Proizvođači specificiraju DC ulaznu struju (*input bias current*) kao

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

I strujni ofset (*input offset current*) kao

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



Pojačavač bez ofseta

Realni operacioni pojačavač

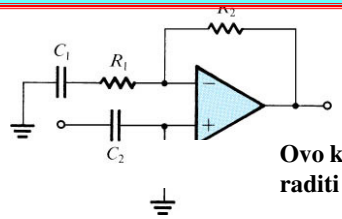
Ostala ograničenja – *struja polarizacije i strujni ofset (razdešenost)*

Način kompenzacije strujnog ofseta objašnjen je u *Dodatku*

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Za ispravan rad OpAmpa neophodno je obezbediti DC vezu između svakog ulaza i mase!!!



Ovo kolo neće ispravno raditi ukoliko se izostavi R_3

Nažalost R_3 smanjuje ulaznu otpornost!!!

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *Potiskivanje napona napajanja Power Supply Rejection Ratio* - PSRR

Pojačanje ne bi trebalo da zavisi od promena napona napajanja.

U praksi nije tako.

Mera kvaliteta OpAmpa je faktor potiskivanja napona napajanja - PSRR.

Kada se iskazuje u dB zove se *Potiskivanje napona napajanja* i označava sa *PSR* ili *SVR* (*Supply Voltage Rejection*)

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – Potiskivanje napona napajanja Power Source Rejection Ratio - PSRR

Potiskivanje napona napajanja:

Ako promena od ΔV_{SS} volti izazove istu promenu izlaznog napona kao promena diferencijalnog ulaznog napona od V_d volti, tada je

$$PSRR = \frac{\Delta V_{SS}}{V_d}$$

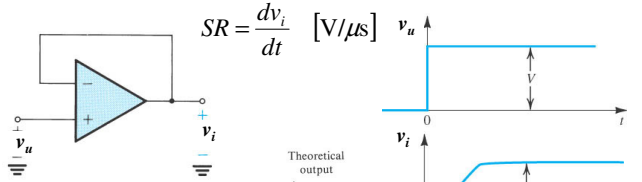
$$PSR = 20\log\left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d}\right]$$ red veličine 90dB

Realni operacioni pojačavač

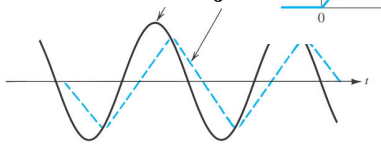
Ostala ograničenja – *slew rate*

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

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



Izazivaju nelinearna izobličenja

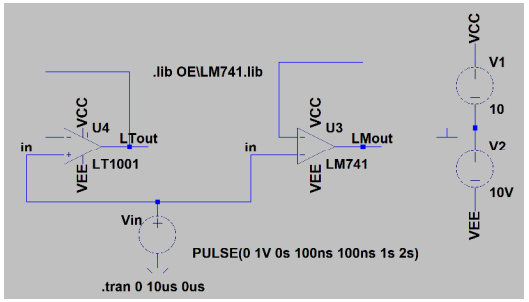


Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *slew rate*

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

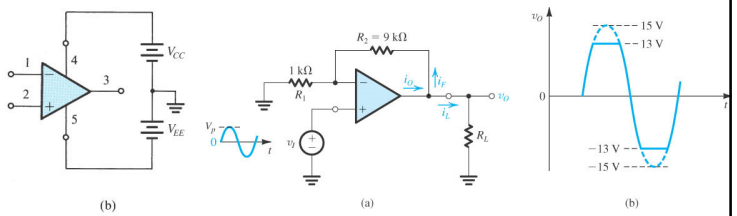
$$SR = \frac{dv_i}{dt} \quad [\mathrm{V}/\mu\mathrm{s}]$$



Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponsko zasićenje

Uvek je manje od +/- napon napajanja



Ako je V_{CC}=+/-15V

***Rated output voltage* =+/-13V**

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujno zasićenje

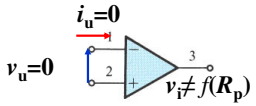
Maksimalna izlazna struja je ograničena.

Za 741 iznosi +/-20mA

Voditi računa pri projektovanju!

Idealni operacioni pojačavač

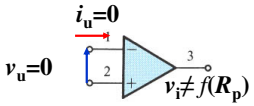
Više o OpAmp u okviru kursa "Analogna elektronika"



$$\mathbf{A} = \left.\frac{v_i}{v_u}\right|_{J_{ul}=0} \quad \text{[V/V]} \qquad R_u = \infty \quad R_i = 0 \quad \mathbf{A} \to \infty$$

do tada – UPAMTITI osobine		**značenje**
beskonačno pojačanje	⇨	$v_u=0 \rightarrow v_+=v_-$
beskonačna ulazna otpornost	⇨	$i_u=0$
izlazna otpornost jednaka nuli	⇨	$v_i \neq f(R_p)$

Idealni operacioni pojačavač



do tada – UPAMTITI osobine		**značenje**
beskonačno pojačanje	⇨	$v_u=0 \rightarrow v_+=v_-$
beskonačna ulazna otpornost	⇨	$i_u=0$
izlazna otpornost jednaka nuli	⇨	$v_i \neq f(R_p)$
ne pojačava *srednju vrednost*	⇨	$A_{cm}=0$ ***Ne pojačava DC***
beskonačni propusni opseg	⇨	***idealne f k-ke*** (prošla nedelja)

Idealni operacioni pojačavač

UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

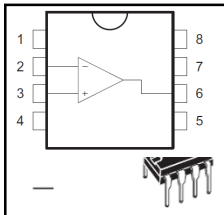
1. Konačno sve što je kod idealnog ∞ ili 0:

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 *srednju vrednost*	⇨	$A_{cm} \neq 0$
propusni opseg konačan	⇨	***realne f k-ke, uzan BW za otvorenu petlju***

Idealni operacioni pojačavač

UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

2. **Naponska razdešenost (*V offset*) 1mV<V_{OS}<5mV**
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** $PSR = 20\log\left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d}\right] \leq 90dB$
6. ***Slew rate*** $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1\text{V}/\mu\text{s}$
7. **Naponsko zasićenje ± |V_{CC}-2V|**
8. **Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) ~ x10mA**



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

UA741

GENERAL PURPOSE SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

N
DIP8
(Plastic Package)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

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

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

Realni oper

Kataloški podaci za

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

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

Idealni operacioni pojačavač

Korisni linkovi

http://www.analog.com/

http://www.national.com/ds/LM/LM741.pdf

http://www.linear.com/

http://www.physics.unlv.edu/~bill/PHYS483/op_amp_datasheet.pdf

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:		U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)		10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe		10%	10%
Kolokvijum I	(poslednja nedelja u novembru)	50%	20%
Kolokvijum II	(poslednja nedelja predavanja)	50%	20%
		120%	60%



Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

Šta smo naučili?

- **Karakteristike idealnog operacionog pojačavača.**
  - **Objasniti značenje beskonačnog naponskog pojačanja, beskonačne ulazne otpornosti i nulte izlazne otpornosti kod idealnog operacionog pojačavača**
  - **Operacioni pojačavač kao invertorski pojačavač (električna šema, izvesti izraz za pojačanje)**
  - **Operacioni pojačavač kao neinvertorski pojačavač (električna šema, izvesti izraz za pojačanje)**

Na web adresi http://leda.elfak .ni.ac.rs

> EDUCATION > ELEKTRONIKA

slajdovi u pdf formatu

Ispitna pitanja?

1. **Kolo za sabiranje.**
2. **Diferencijalni pojačavač.**
3. **Instrumentacioni pojačavač.**
4. **Kolo za diferenciranje/integraljenje.**
5. **Primer realizacije aktivnog filtra (električna šema).**
6. **Parametri realnog OpAmp pojačanje u otvorenoj petlji, ulazna i izlazna otpornost, amplitudska karakteristika.**
7. **Efekat konačnog pojačanja OpAmpa na naponsko pojačanje (ne)invertorskog pojačavača.**
8. **Efekat konačnog propusnog opsega OpAmpa na naponsko pojačanje invertorskog pojačavača.**
9. **Parametri realnog OpAmp naponska i strujna razdešenost, slew rate, PSRR (definicija i manifestovanje).**

Sledećeg časa

Modeli poluprovodničkih komponenata

(Osnovni jednostepeni pojačavači sa BJT)

Dodatak:

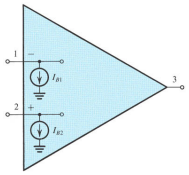
Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *strujni ofset (razdešenost)*

Razlika struja polarizacije naziva se struni ofset ili strujna razdešenost.

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

input offset current



Pojačavač bez ofseta

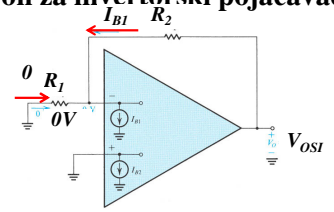
Dodatak:

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Strujni ofset se manifestuje kroz DC napon na izlazu u odsustvu signala. Koliki je on za invertorski pojačavač?

$$V_{OSI} = I_{B1}R_2 \cong I_B R_2$$



Ranije je rečeno da veća ulazna otpornost zahteva veće R_1, a da bi se održalo pojačanje, mora i R_2 da se poveća.

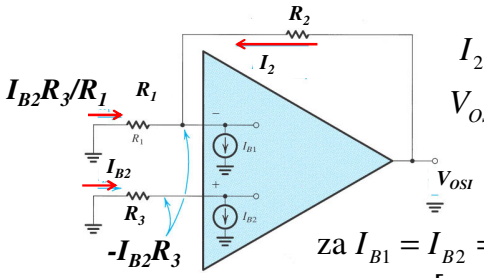
Sada se vidi da veće R_2 izaziva i veći V_{OSI}!

Dodatak:

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Uticaj strujnog ofseta može da se umanji vezivanjem R_3



$$I_2 = I_{B1} - I_{B2}R_3 / R_1$$

$$V_{OSI} = -I_{B2}R_3 + I_2 R_2$$

za $I_{B1} = I_{B2} = I_B$

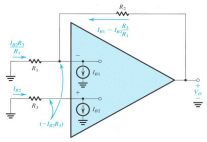
$$V_{OSI} = I_B[R_2 - R_3(1 + R_2 / R_1)]$$

Dodatak:

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Da bi V_{OSI}=0, potrebno je izabrati



$$R_3 = \frac{R_2}{1 + R_2 / R_1} = \frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2}$$

za $I_{B1} = I_B + I_{OS}/2$ i $I_{B2} = I_B - I_{OS}/2$

$$V_{OSI} = I_{OS}R_2$$

Za red veličine (I_{OS} umesto I_B) manje nego bez R_3

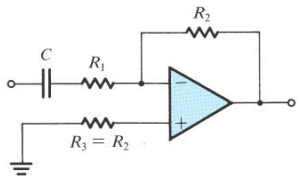
Dodatak:

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Da bi se smanjio strujni ofset, R_3 treba da bude jednak ulaznoj otpornosti za DC signal na invertorskom ulazu.

Za kolo sa slike



treba $R_3 = R_2$

30. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 125