# 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



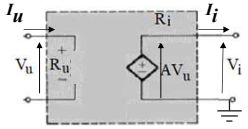
**Zašto "Operacioni"?**



**Da se podsetimo**

**Operacioni pojačavač po karakteristikama liči na idelani naponski pojačavač**

**Naponski**



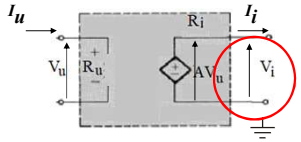

$$\mathbf{A} = \left.\frac{V_i}{V_u}\right|_{I_u=0} \quad [\mathbf{V/V}]$$

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

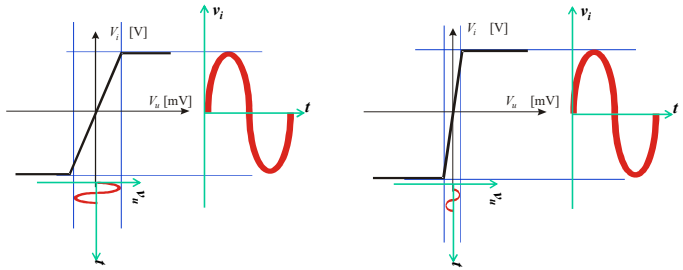


$$V_u = 0$$



## Idealni operacioni pojačavač

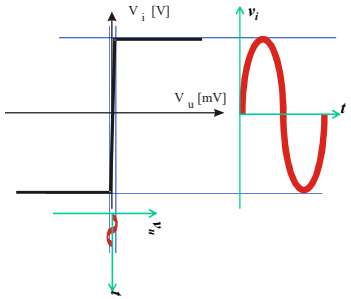
**Prenosna karakteristika**






## Idealni operacioni pojačavač

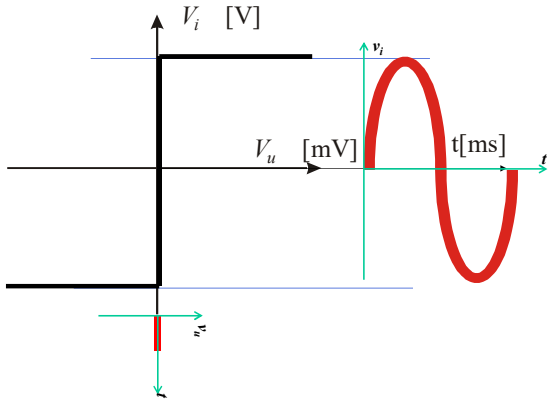
**Prenosna karakteristika**






## Idealni operacioni pojačavač

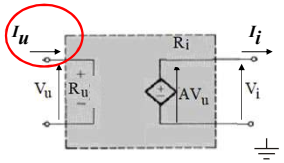
**Idealna prenosna karakteristika**



**da se podsetimo**

**Idealni operacioni pojačavač**

**Naponski** — **Idealni**




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

$R_u = \infty$

$R_i = \mathbf{0}$

$\mathbf{A} \to \infty$

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

**Pojačavači koji imaju beskonačnu ulaznu otpornost:**

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

**Ne *opterećuju* prethodni stepen!!!**



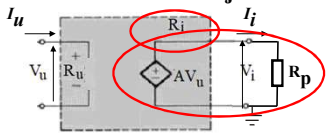
**da se podsetimo**

**Idealni operacioni pojačavač**

**Naponski**

**Pojačavači koji imaju izlaznu otpornost jednaku nuli**

**Idealni**




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

$R_u = \infty$

$R_i = \mathbf{0}$

$\mathbf{A} \to \infty$

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

($R_i \to 0$)

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

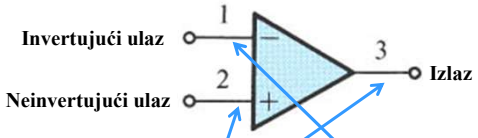
**Pojačavači koji imaju nultu izlaznu otpornost:**

**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?**



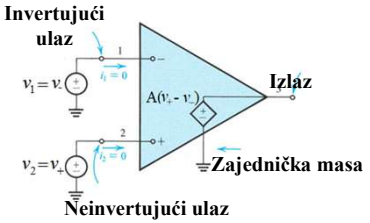


**Idealni operacioni pojačavač**

**Treba da pojačava**

***razliku signala***

**na neinvertujućem "+" i invertujućem "–" ulazu**

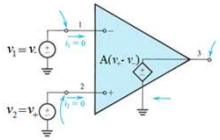



$$v_u = v_d = v_+ - v_-$$

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

**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:**

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

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

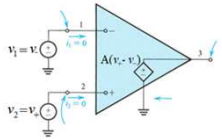
**Želimo samo pojačanje razlike signala na izlazu (šumovi)**



**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**

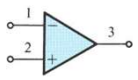
$$A = A_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \Rightarrow v_+ - v_- = 0 \qquad v_+ = v_-$$

**Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR**

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



**Idealni operacioni pojačavač**



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

$$R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

$$A_{cm} = 0$$

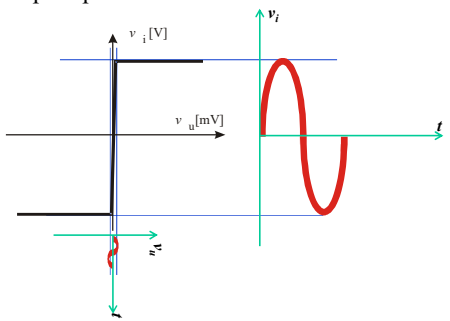
**Idealne operacione pojačavače karakterišu**

- **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***



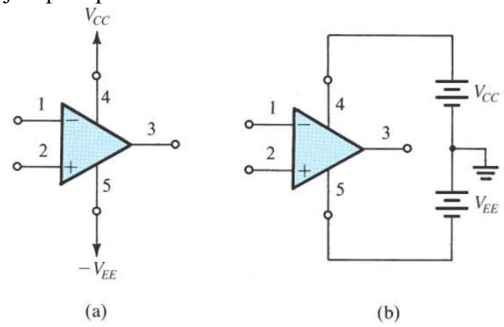
**Idealni operacioni pojačavač**

Polarizacija OpAmp-a



**Idealni operacioni pojačavač**

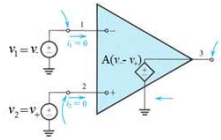
Polarizacija OpAmp-a






**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**

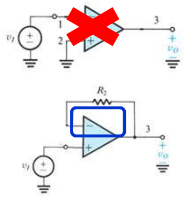
***pojačanje u otvorenoj petlji* (*Open loop gain*)**



**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:**

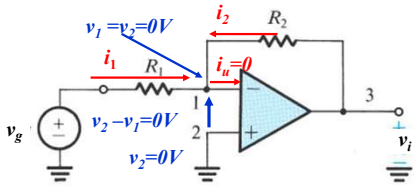
**Razlika napona između $v_+$-$v_-$=0, odnosno $v_+=v_-$**

Idealni operacioni pojačavač

***Invertorski pojačavač* –***

**izlazni signal suprotne faze od ulaznog**

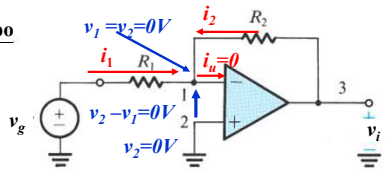
**Koliko je pojačanje u zatvorenoj petlji $A=v_i/v_g$ ?**






Idealni operacioni po

***Invertorski pojačavač***




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

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

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

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

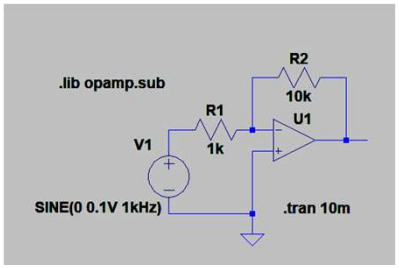
$$A=\frac{v_i}{v_g}=-\frac{R_2}{R_1}$$



Idealni operacioni pojačavač

***Invertorski pojačavač***

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

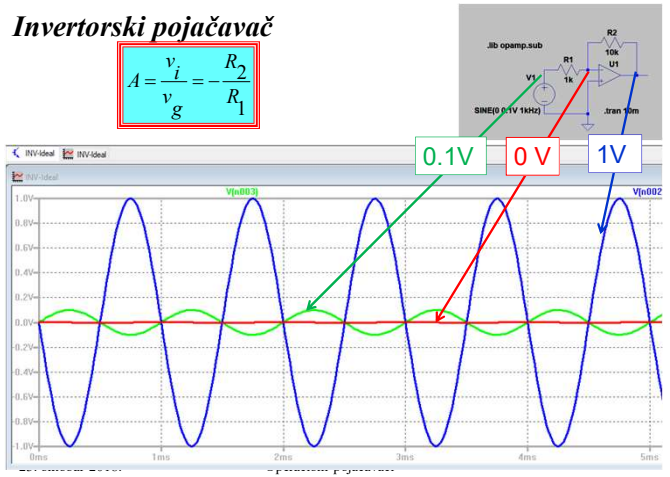





Idealni operacioni pojačavač

***Invertorski pojačavač***

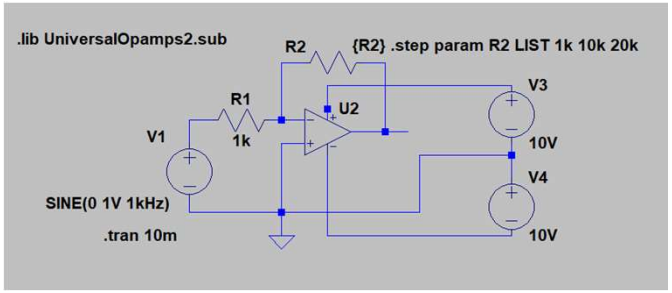
$$A=\frac{v_i}{v_g}=-\frac{R_2}{R_1}$$



Idealni operacioni pojačavač

## *Invertorski pojačavač*

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

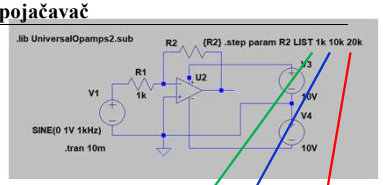


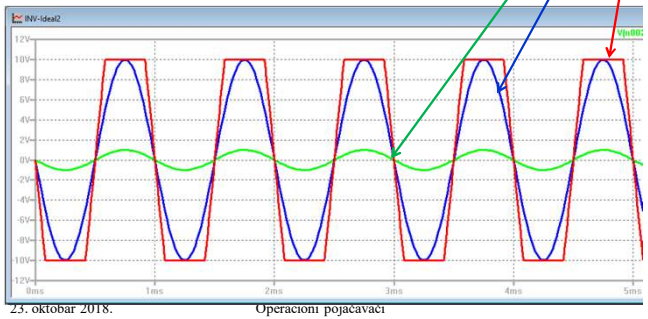



Idealni operacioni pojačavač

## *Invertorski pojačavač*

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






Idealni operacioni pojačavač

## Invertorski pojačavač

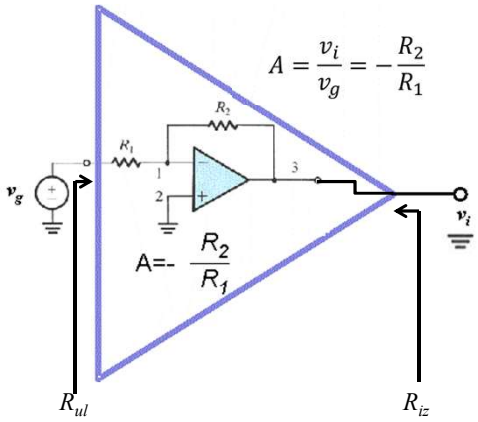
**osobine**

Naponsko pojačanje

Ulazna otpornost

Izlazna otpornost

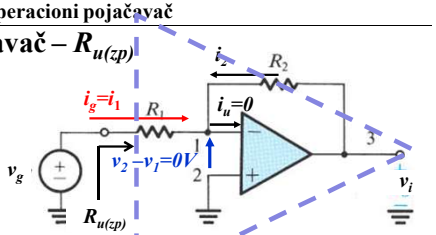
$$A = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{R_2}{R_1}$$






Idealni operacioni pojačavač

## Invertorski pojačavač – $R_{u(zp)}$




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

$i_g = i_1$

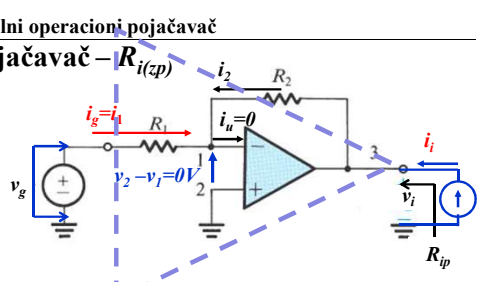
$$i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} \overset{0V}{=} \frac{v_g}{R_1}$$

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

**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)!!!

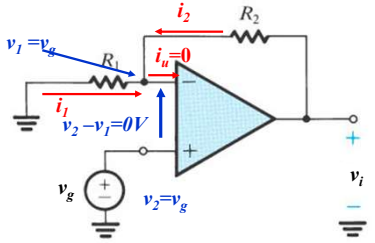




***Neinvertorski pojačavač –***

**izlazni signal je u fazi sa ulaznim**

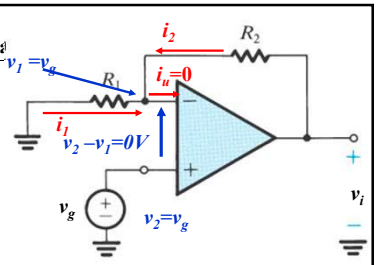
**Koliko je pojačanje u zatvorenoj petlji $A=v_i/v_g$?**








***Neinvertorski pojačavač***




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

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

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

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

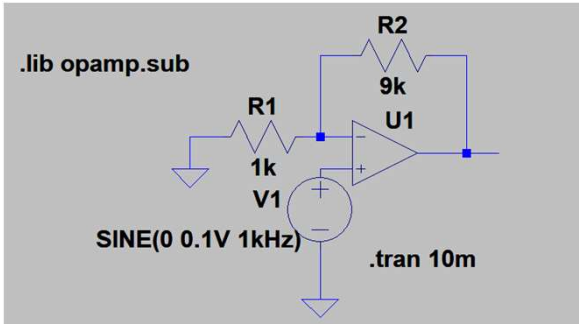
$$A = \frac{v_i}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$





***Neinvertorski pojačavač***

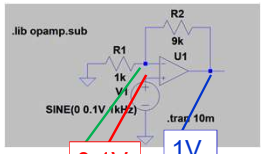
$$A = \frac{v_i}{v_g} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

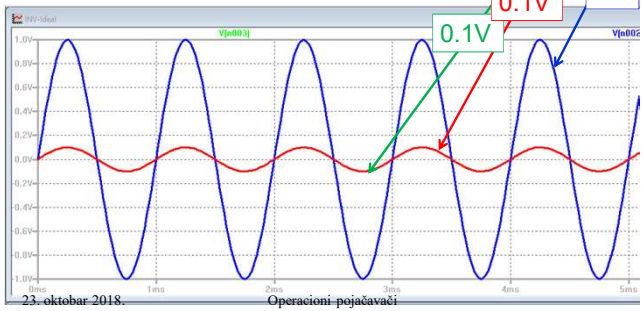


**Idealni operacioni pojačavač**

## *Neinvertorski pojačavač*

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



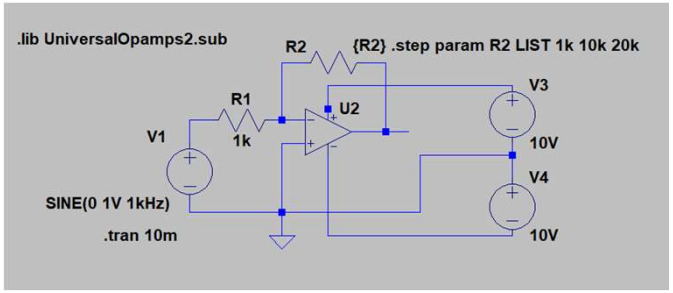






**Idealni operacioni pojačavač**

## *Neinvertorski pojačavač*

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

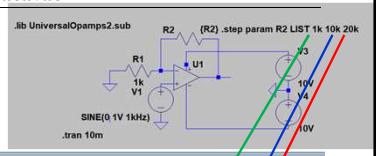


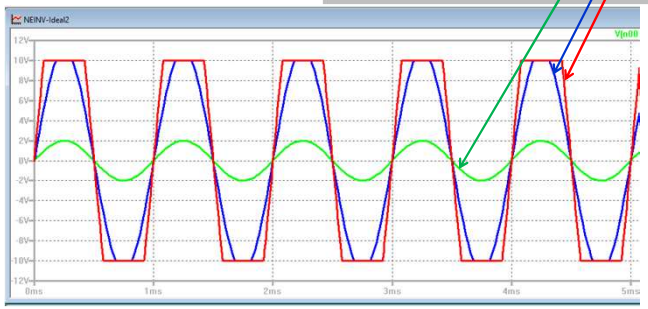



**Idealni operacioni pojačavač**

## *Neinvertorski pojačavač*

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



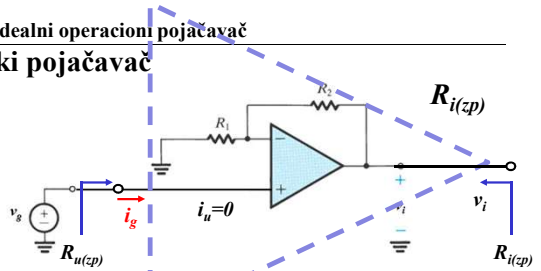





**Idealni operacioni pojačavač**

## Neinvertorski pojačavač

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



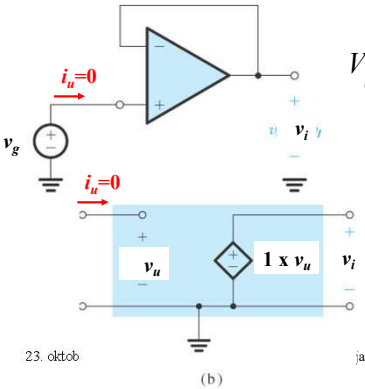

$i_g = i_u = 0$

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

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

Idealni operacioni pojačavač

## Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)




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

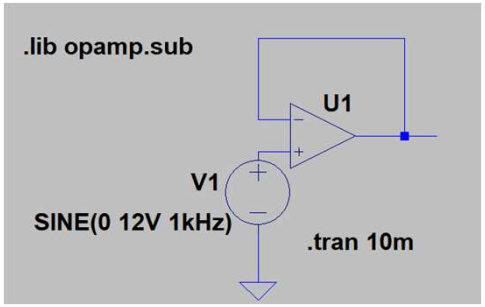
$$R_{u(zp)} \to \infty;$$

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



Idealni operacioni pojačavač

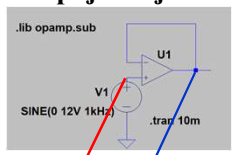
## Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)

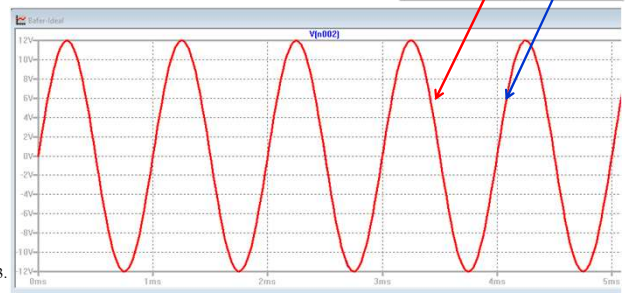





Idealni operacioni pojačavač

## Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)

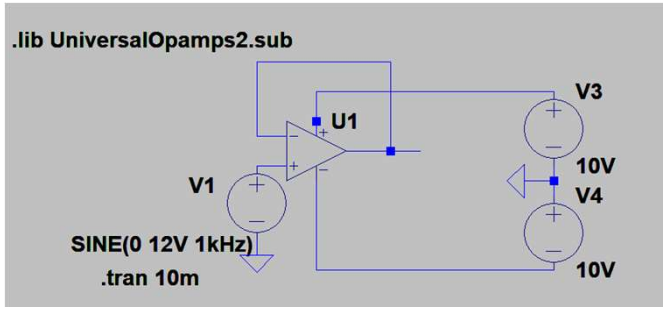


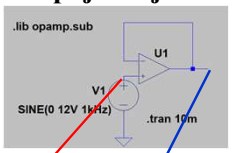


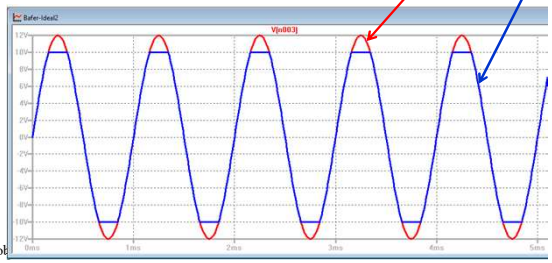

Idealni operacioni pojačavač

## Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)



## Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem - bafer (buffer)

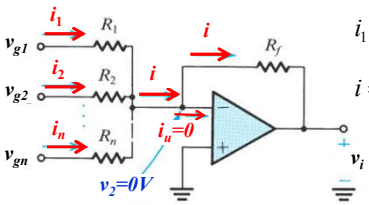






## *Kolo za sabiranje – Weighted Summer*




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

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

$$v_i = 0 - iR_f$$

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

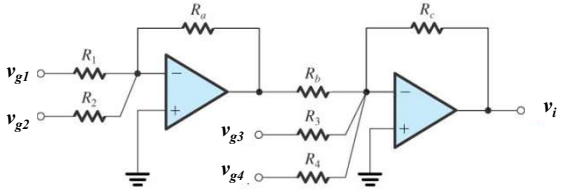






## Domaći 4.1

**Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike**



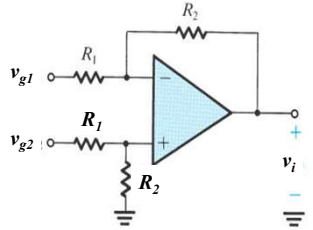

$$v_i = \frac{R_a}{R_1}\frac{R_c}{R_b}v_{g1} + \frac{R_a}{R_2}\frac{R_c}{R_b}v_{g2} - \frac{R_c}{R_3}v_{g3} - \frac{R_c}{R_4}v_{g4}$$





## *Diferencijalni balansni* pojačavač

**Kolo za „oduzimanje“ – pojačavač razlike signala na generatorima**




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

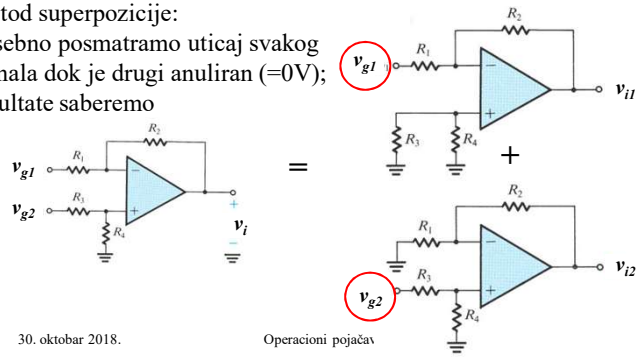
**Četvrta nedelja**

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

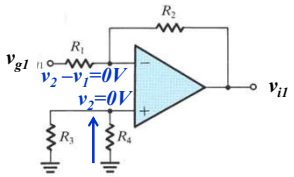


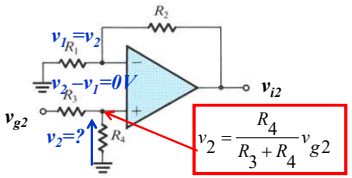



Idealni operacioni pojačavač

## Diferencijalni balansni pojačavač

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




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

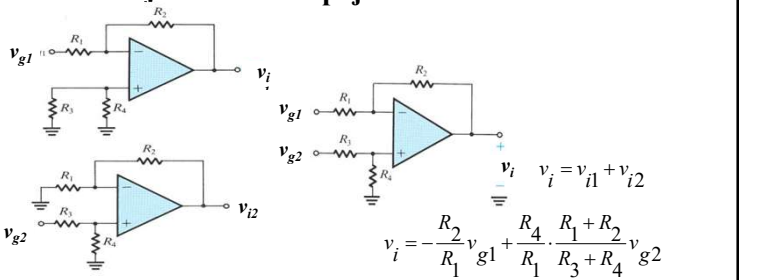
$$v_{i2} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) v_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{g2}$$

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



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

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

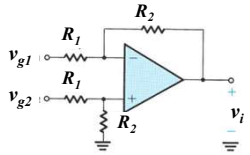
$$v_i = \frac{R_2}{R_1}\left(v_{g2} - v_{g1}\right)$$



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

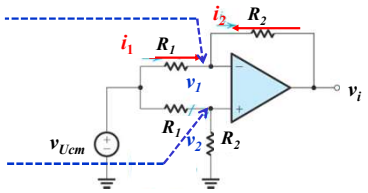
Idealni operacioni pojačavač

## Diferencijalni balansni pojačavač – $A_{cm}$ u zatvorenoj petlji

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

$$v_1 = v_2$$

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




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

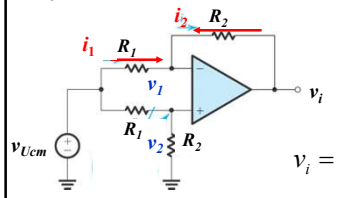
$$v_i = v_1 + i_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} + i_2 R_2$$



Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

## Diferencijalni balansni pojačavač – $A_{cm}$ u zatvorenoj petlji




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

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

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

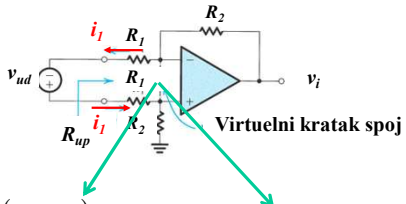
$$A_{cm} = \frac{v_i}{v_{Ucm}} = 0$$



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.**

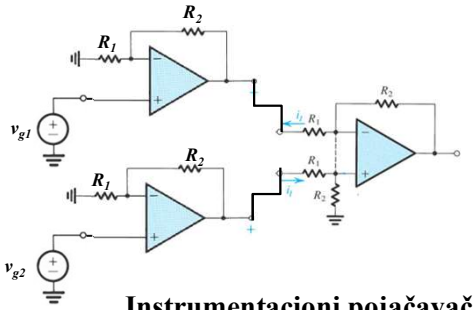
**Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?**



Idealni operacioni pojačavač

## Diferencijalni balansni pojačavač

**Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?**





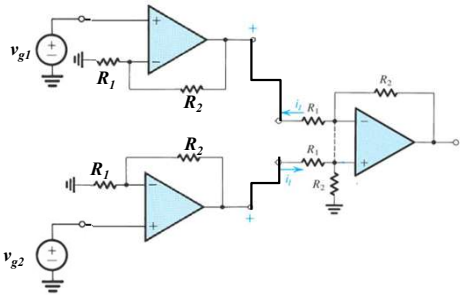

**Instrumentacioni pojačavač**



Idealni operacioni pojačavač

## Diferencijalni balansni pojačavač

**Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?**

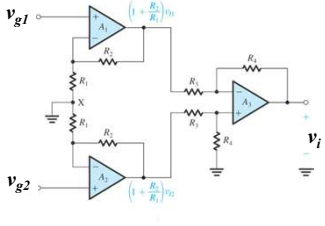







Idealni operacioni pojačavač

## *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 ☹

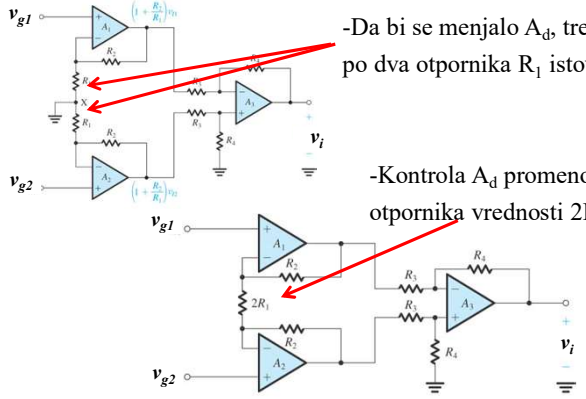
-Da bi se menjalo $A_d$, treba menjati po dva otpornika $R_n$ istovremeno ☹



Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

## Instrumentacioni pojačavač

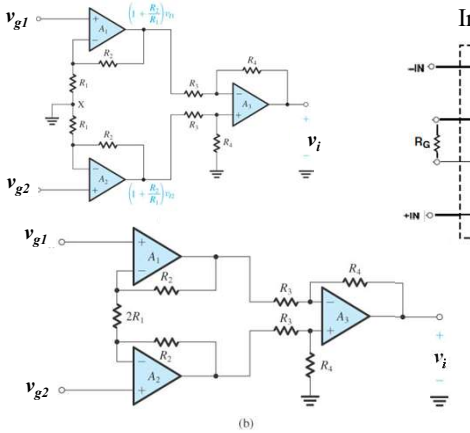



-Da bi se menjalo $A_d$, treba menjati po dva otpornika $R_1$ istovremeno

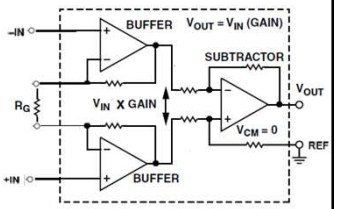
-Kontrola $A_d$ promenom jednog otpornika vrednosti $2R_1$

**Idealni operacioni pojačavač**

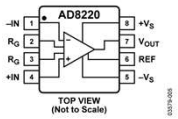
## Instrumentacioni pojačavač



Integrisano kolo








**Idealni operacioni pojačavač**

## Instrumentacioni pojačavač

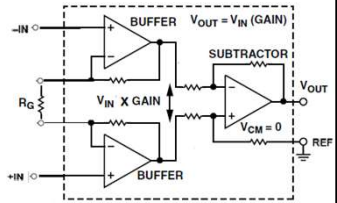
NIJE isto što i operacioni!

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

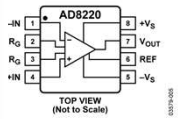
$V_{OUT} - V_{REF} = G(V_{IN+} - V_{IN-})$

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

Integrisano kolo







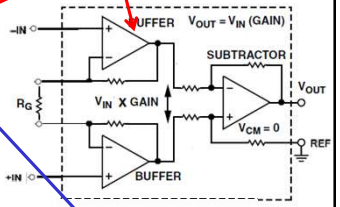

**Idealni operacioni pojačavač**

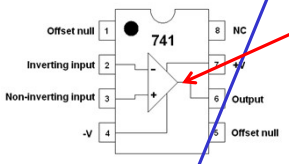
## Instrumentacioni pojačavač

NIJE isto što i operacioni!

IAKO ISTO IZGLEDAJU U RADNJI!

Integrisano kolo




OPERACIONI



Instrumentacioni

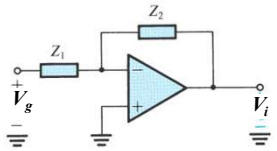




**Idealni operacioni pojačavač**

***Invertujući pojačavač sa impedansama –***

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



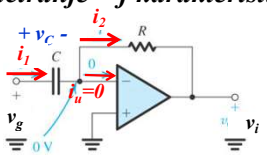

$$A = \frac{V_i(s)}{V_g(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

Idealni operacioni pojačavač

## *Kolo za diferenciranje – f karakteristika*



*diferenciranje?*




(a)

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

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

$$i_1 = i_2$$

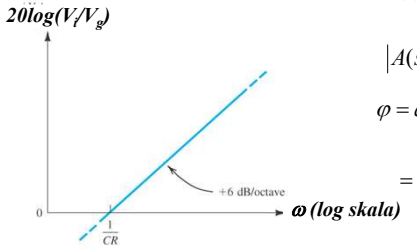
$$sCv_g = -\frac{v_i}{R} \Rightarrow v_i = -s \cdot R \cdot C \cdot v_g$$

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



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

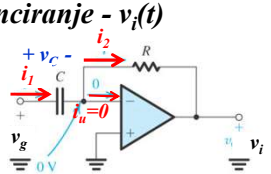


Idealni operacioni pojačavač

## *Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$*



*diferenciranje?*




(a)

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

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

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

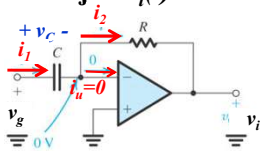
$$i_1(t) = i_2(t)$$

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



Idealni operacioni pojačavač

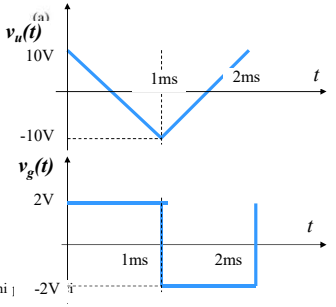
## Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$




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

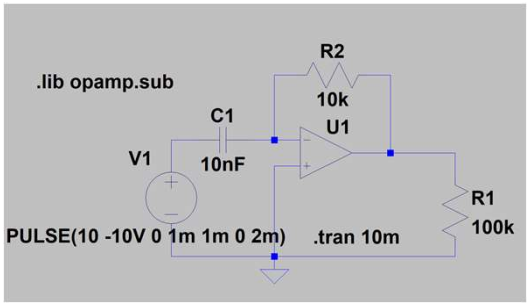
Kako će izgledati talasni oblik napona na izlazu kola za diferenciranje sa R=10k i C=10nF ako se pobudi trougaonim talasnim impulsima sa slike:





**Idealni operacioni pojačavač**

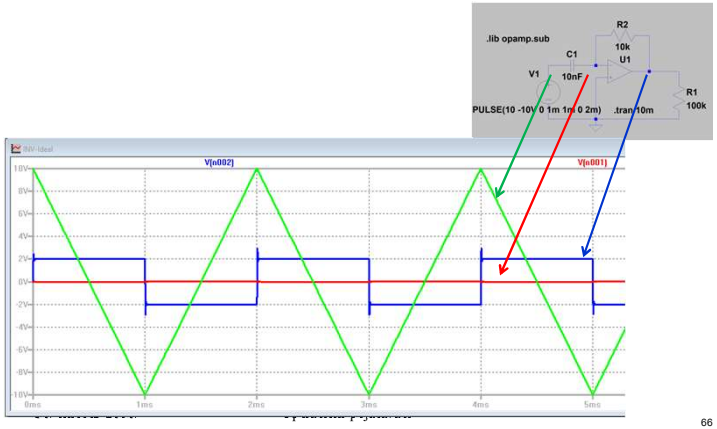
Kolo za diferenciranje






**Idealni operacioni pojačavač**

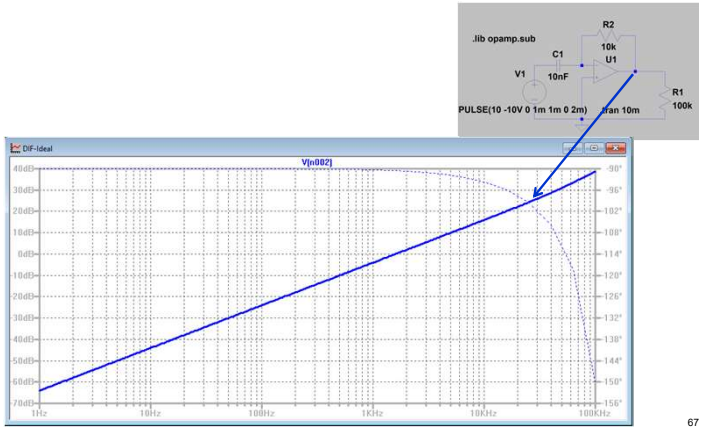
Kolo za diferenciranje






**Idealni operacioni pojačavač**

Kolo za diferenciranje



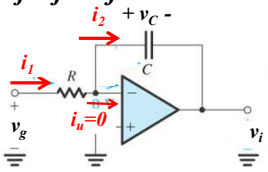



**Idealni operacioni pojačavač**

***Kolo za integraljenje – f karakteristika***



*integraljenje?*




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

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

$$i_1 = i_2$$

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

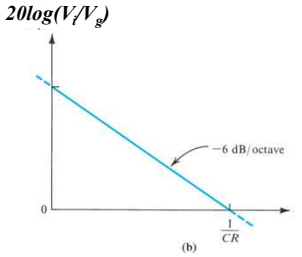
$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -\frac{1}{sRC} = -\frac{\omega_o}{s}$$

## Kolo za integraljenje – f karakteristika

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

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

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

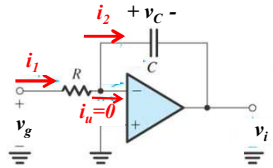



Ponaša se kao NF filtar sa graničnom frekvencijom u nuli





## Kolo za integraljenje - $v_i(t)$




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

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

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

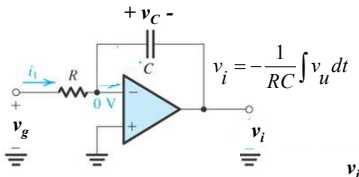
$$i_1(t) = i_2(t)$$

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

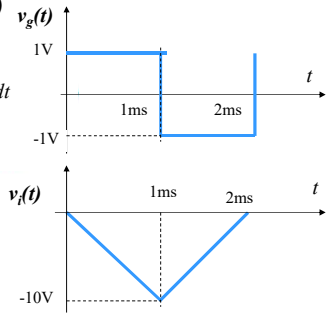




## Kolo za integraljenje - $v_i(t)$




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




$R$=10k

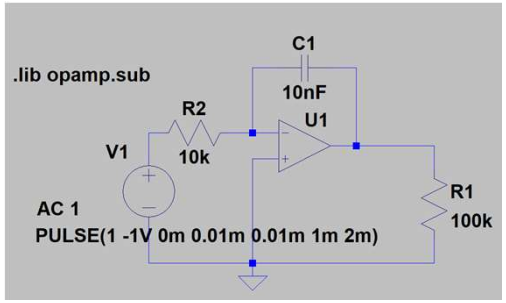
$C$=10$nF$

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



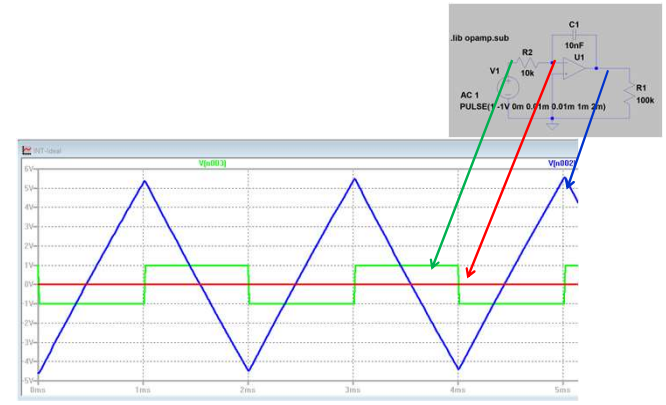


Kolo za integraljenje



**Idealni operacioni pojačavač**

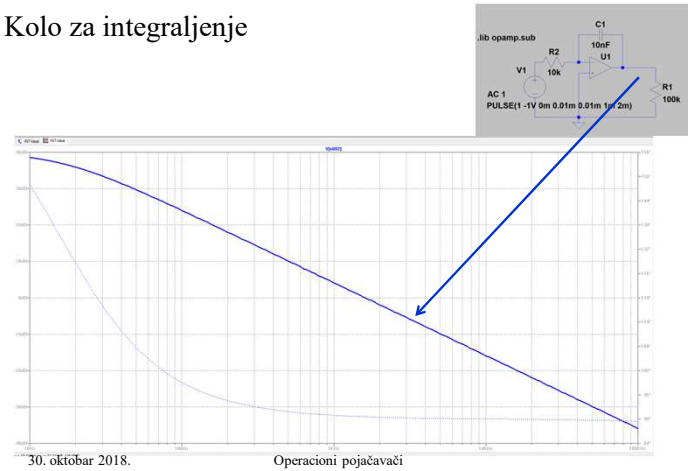
Kolo za integraljenje






**Idealni operacioni pojačavač**

Kolo za integraljenje



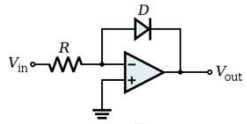


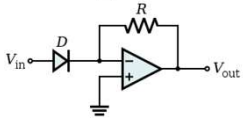

**Zašto "Operacioni"?**



**Mogu da se koriste za različite računske OPERACIJE**

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




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



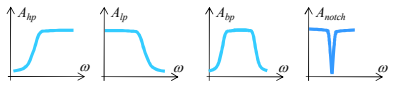
Za one koji žele da nauče više

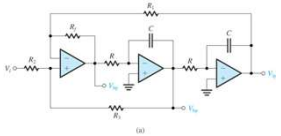
**Idealni operacioni pojačavač**

**Pored toga**

**Mogu da se koriste za različite druge korisne primene**

- **Aktivni filtri**

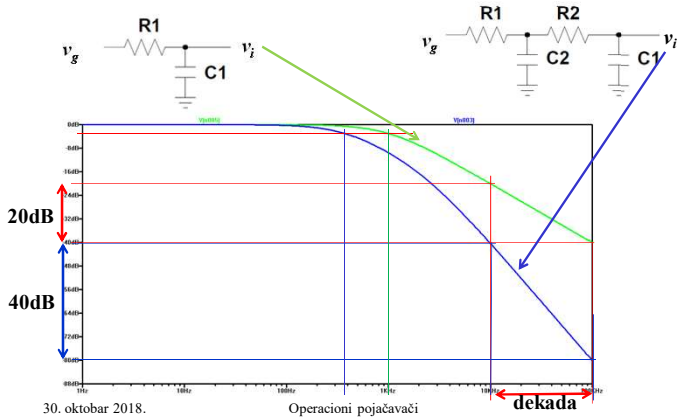


- Komparatori
- Precizni usmerači
- Oscilatori (biće obrađeni kasnije u okviru kursa)

Za one koji žele da nauče više

**Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)**

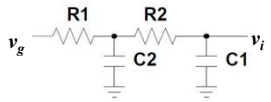





Za one koji žele da nauče više

**Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)**

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




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

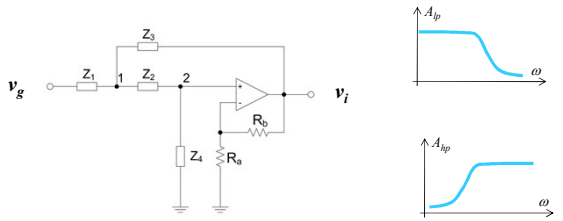
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{\frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_2C_2}\right) + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2}}$$



Za one koji žele da nauče više

**Idealni operacioni pojačavač**

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




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

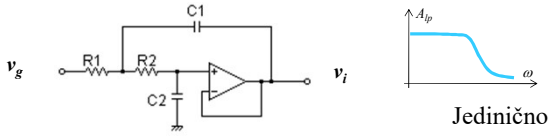
http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php



Za one koji žele da nauče više

**Idealni operacioni pojačavač**

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




Jedinično pojačanje:
$v_+ = v_- = v_i$

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

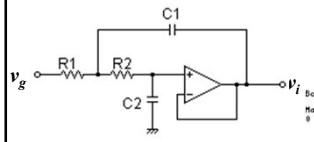
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{R_1C_1R_2C_2s^2 + (R_1C_2 + R_2C_2)s + 1}$$

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

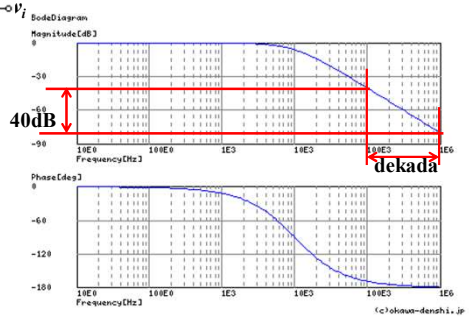
Za one koji žele da nauče više

**Idealni operacioni pojačavač**

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




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

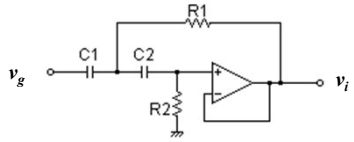


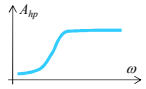



Za one koji žele da nauče više

**Idealni operacioni pojačavač**

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




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

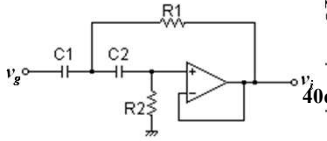
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$$



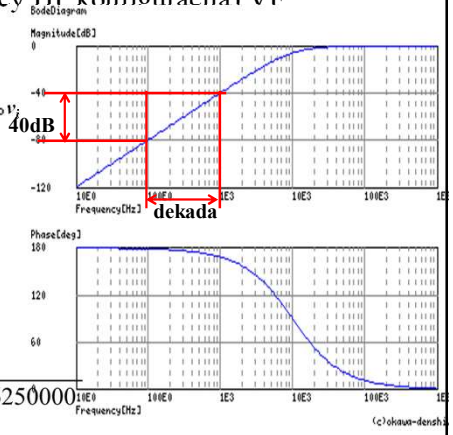
Za one koji žele da nauče više

**Idealni operacioni pojačavač**

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




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

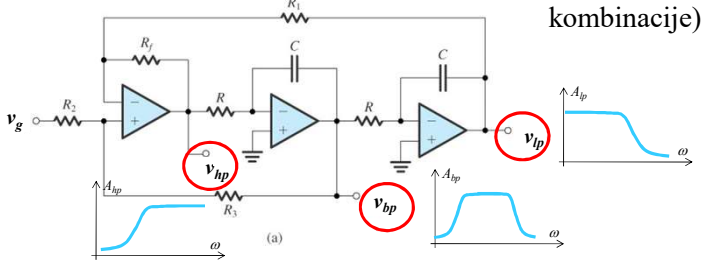


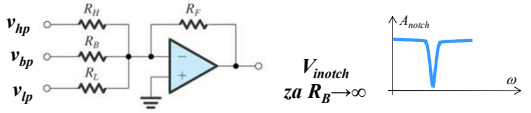

$$A(s) = \frac{s^2}{s^2+125000s+3906250000}$$



**Idealni operacioni pojačavač**

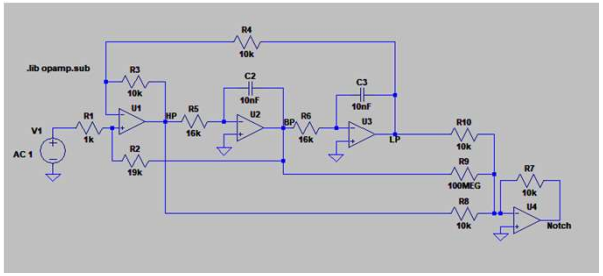
***Aktivni filtri*** – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)



**Idealni operacioni pojačavač**

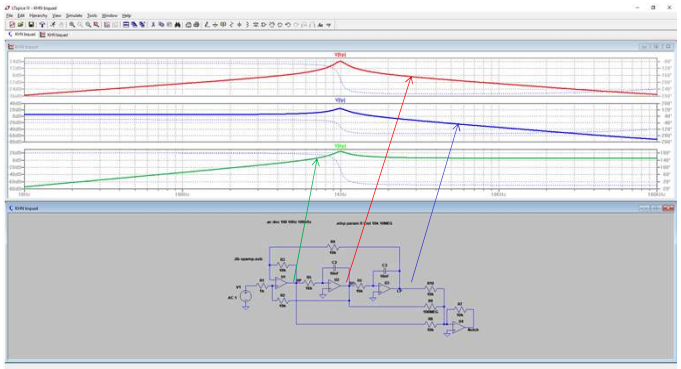
***Aktivni filtri*** – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)






**Idealni operacioni pojačavač**

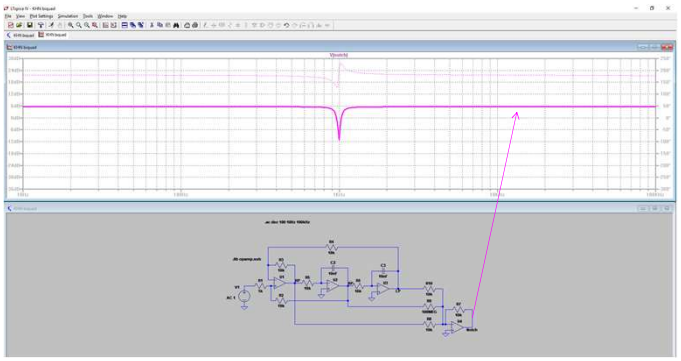
***Aktivni filtri*** – (kola za diferenciranje i integraljenje i kombinacije)





**Idealni operacioni pojačavač**

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

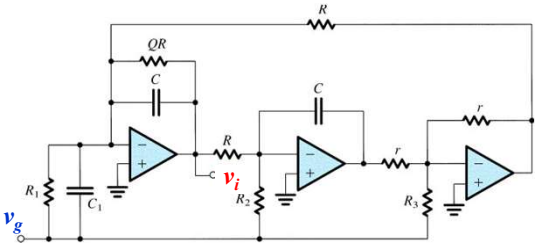




Za one koji žele da nauče više

**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**

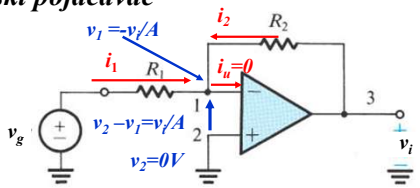
- **pojačanje nije beskonačno** ⇒ $v_u=v_i/A$
- **ulazna otpornost konačna** ⇒ $i_u \neq 0$
- **izlazna otpornost konačna** ⇒ $v_i=f(R_p)$
- **pojačava *srednju vrednost*** ⇒ $A_{cm}\neq 0$
- **propusni opseg konačan** ⇒ ***realne f k-ke***



## Realni operacioni pojačavač

**Efekti konačnog *pojačanja***

***Invertorski pojačavač***




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

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

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

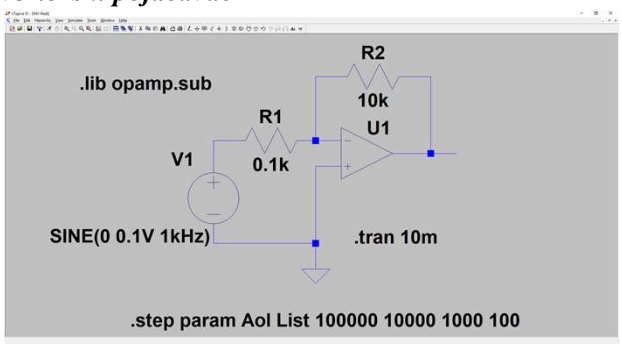
$$\Rightarrow A_r=\frac{v_i}{v_g}=\frac{-R_2/R_1}{1+(1+R_2/R_1)/A}$$



## 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)**

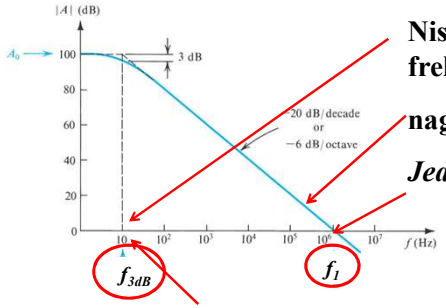
**Da li je to dobro?**





## Efekti konačnog *propusnog opsega* (otvorena petlja)

**Realna amplitudsta karakteristika (opamp 741)**




**Niska "granična" frekvencija**

**nagib -20dB/dec**

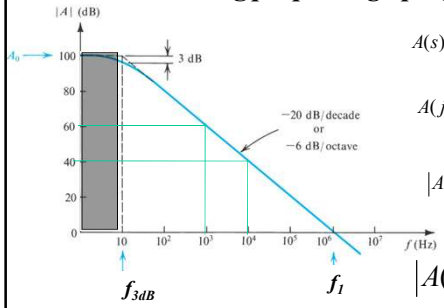
***Jediničnо pojačanje***

***Jedan dominantan pol***





## Efekti konačnog *propusnog opsega* (otvorena petlja)




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

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

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

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

***$f_1$=$\omega_1$/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***

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

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

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

$$\omega_{3dB\,ZP} = \frac{\omega_1}{1+R_2/R_1}$$

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



Realni operacioni pojačavač

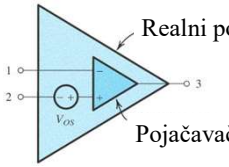
**Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset***

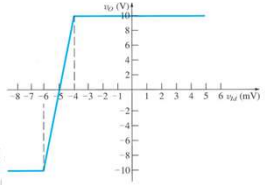
**Ukoliko se ulazi u pojačavač kratkospoje i vežu za masu, a postoji napon na izlazu, to je posledica naponske razdešenosti.**

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

**Zavisi od temperature** μV/°C

**Model:**



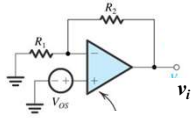





Realni operacioni pojačavač

**Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset***

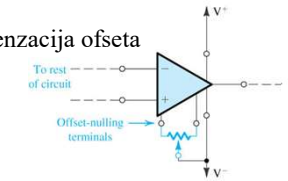
**Uticaj naponskog ofseta na invertujući i neinvertujući pojačavač je identičan:**

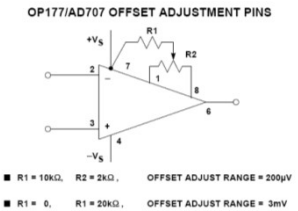



Pojačavač bez ofseta

$$V_I = V_{OS}\left[1+\frac{R_2}{R_1}\right]$$ (Manji za veće $R_1$)

Kompenzacija ofseta



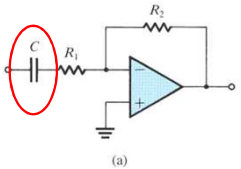


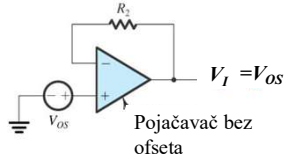

Realni operacioni pojačavač

**Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset***

**Smanjenje uticaja ofseta kod invertujućeg pojačavača.**

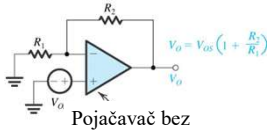
**Primenljivo samo za VF signale**




Pojačavač bez ofseta

**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)*

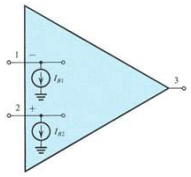
**Da bi se polarizovali aktivni elementi (biće reči kasnije) u OpAmpu moraju da teku jednosmerne struje i u odsustvu ulaznih signala ($I_u$ nije nula!).**

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

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

**I strujni ofset (*input offset current*) kao**

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



Pojačavač bez ofseta



Realni operacioni pojačavač

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

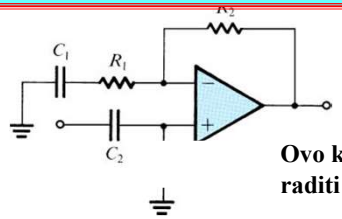
**Način kompenzacije strujnog ofseta objašnjen je u *Dodatku***



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 $\Delta V_{SS}$ 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

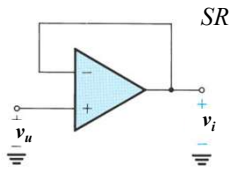


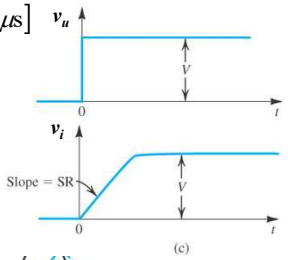
Realni operacioni pojačavač

## Ostala ograničenja – *slew rate*

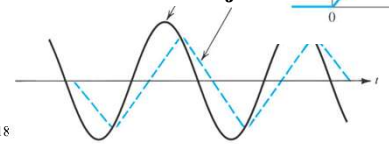
**Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu**

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




**Izazivaju nelinearna izobličenja**



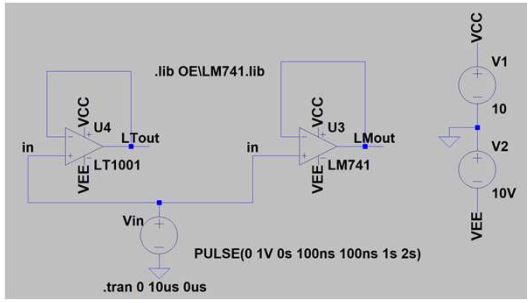


Realni operacioni pojačavač

## Ostala ograničenja – *slew rate*

**Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu**

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

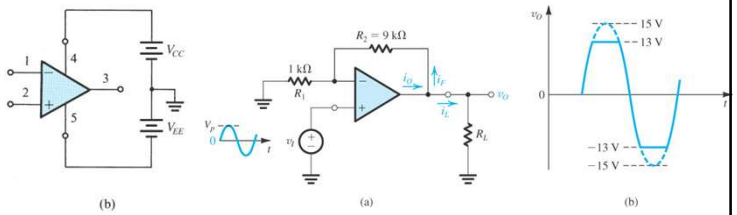





Realni operacioni pojačavač

## *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.**

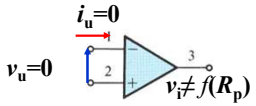
**Za 741 iznosi +/-20**mA

**Voditi računa pri projektovanju!**



Idealni operacioni pojačavač

**Više o OpAmp u okviru kursa "Analogna elektronika"**

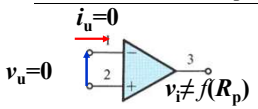



$$\mathbf{A} = \left.\frac{v_i}{v_u}\right|_{J_{ul}=0} \quad \text{[V/V]} \qquad R_u = \infty \quad R_i = 0 \quad \mathbf{A} \to \infty$$

| 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**

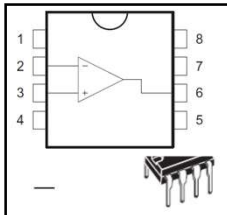
**1. Konačno sve što je kod idealnog ∞ ili 0:**

| | | |
|---|---|---|
| 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* |

## UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

2. Naponska razdešenost (*V offset*) $1\text{mV}<V_{OS}<5\text{mV}$
3. Struja polarizacije (*I bias*) $I_B = \frac{I_{B1}+I_{B2}}{2} \le 100\text{nA}$
4. Strujna razdešenost (*I offset*) $I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \le 10\text{nA}$
5. Potiskivanje napona napajanja $PSR = 20\log\left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d}\right] \le 90dB$
6. *Slew rate* $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1\text{V}/\mu\text{s}$
7. Naponsko zasićenje $\pm |V_{CC}\text{-}2\text{V}|$
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.





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





## 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:*

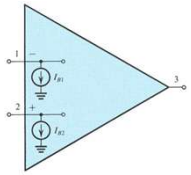
Realni operacioni pojačavač

## 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



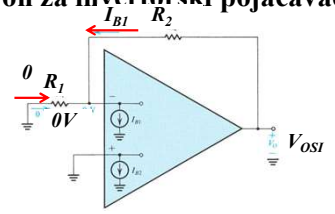
*Dodatak:*

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 $V_{OSI}$!**

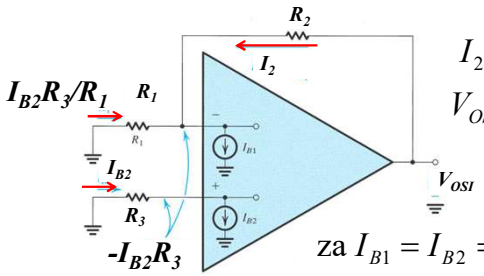


*Dodatak:*

Realni operacioni pojačavač

## Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

**Uticaj strujnog ofseta može da se umanji vezivanjem $R_3$**




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

$$V_{OSI} = -I_{B2}R_3 + I_2R_2$$

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

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

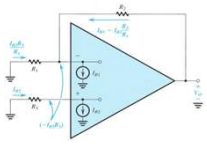


*Dodatak:*

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 $R_3$**

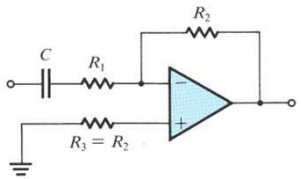
*Dodatak:*

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 $R_3 = R_2$**