

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (26.11.2016.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2017.)	50%	20%
	-----	-----
	120%	60%



Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izadite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

03. novembar 2016.

Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

1

1

Sadržaj

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

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

2

Operacioni pojačavači



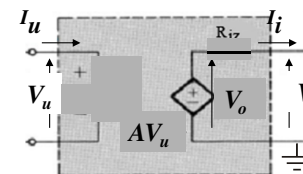
Zašto "Operacioni"?

3

Da se podsetimo

Operacioni pojačavač po karakteristikama liči na idelani naponski pojačavač

Naponski



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

Idealni

$$R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

$$A \rightarrow \infty$$



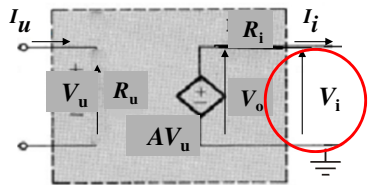
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

4

Idealni operacioni pojačavač

Naponski



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

Idealni
 $R_u = \infty$
 $R_i = 0$
 $A \rightarrow \infty$

beskonačno pojačanje !!!

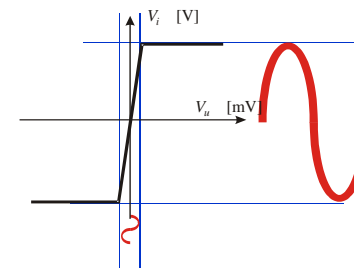
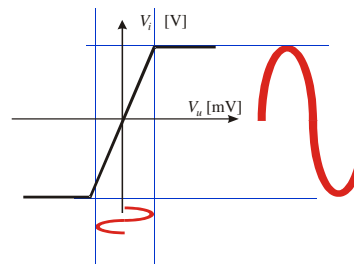
$$A = \frac{V_i}{V_u} \rightarrow \infty \Rightarrow V_i \rightarrow \infty$$

$$V_u = 0$$



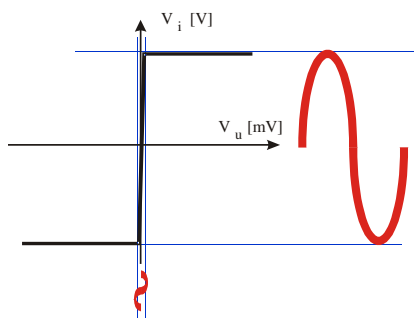
Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika



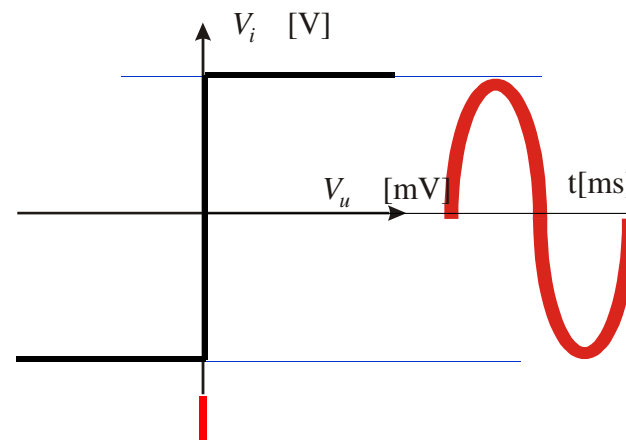
Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika



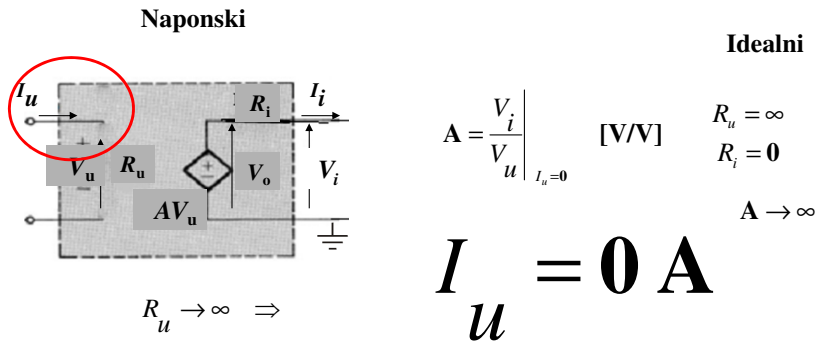
Idealni operacioni pojačavač

Idealna prenosna karakteristika



da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač



Pojačavači koji imaju beskonačnu ulaznu otpornost:

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

Ne opterećuju prethodni stepen!!!

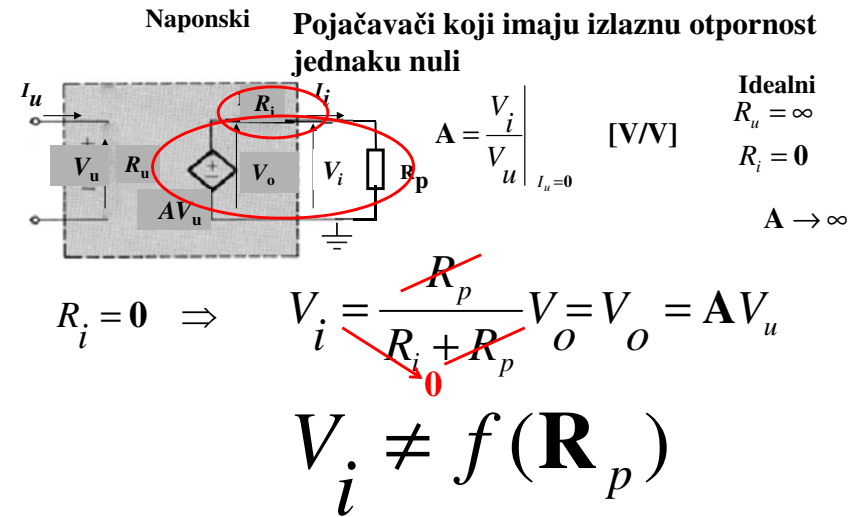
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

9

da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač



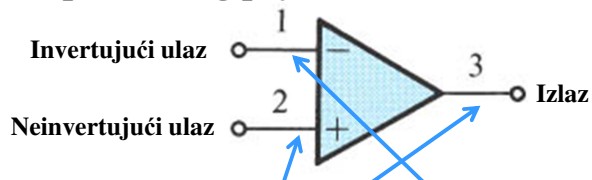
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

10

Idealni operacioni pojačavač

Simbol operacionog pojačavača



Dva ulazna priključka
neinvertujući “+”

i invertujući “-” ulaz

Jedan izlazni priključak

Šta operacioni pojačavač pojačava kad ima dva ulaza?



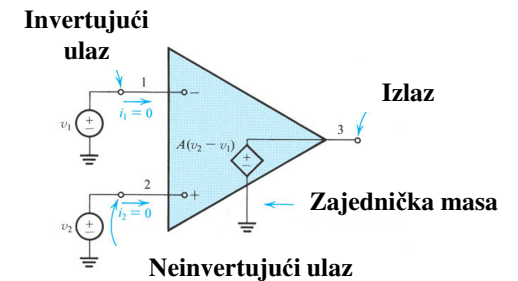
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

11

Idealni operacioni pojačavač

Treba da pojačava
razliku signala na
neinvertujućem “+” i
invertujućem “-”
ulazu



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

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

Na slici $v_- = v_1$, $v_+ = v_2$

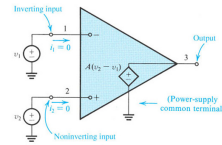
03. Novembar 2016.

Operacioni pojačavači

12

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:

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

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

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

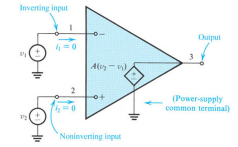
$$A = A_{cm} = \frac{v_i}{v_{ucm}} = \frac{v_i}{\frac{1}{2}(v_+ + v_-)} = 0,$$

a razlika signala mora maksimalno da se pojača

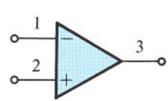
$$A = A_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \quad v_+ - v_- = 0 \quad v_+ = v_-$$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR

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



Idealni operacioni pojačavač



$$A = \frac{V_i}{V_u} \Big|_{I_u=0}$$

[V/V]

$$R_u = \infty$$

$$R_i = 0$$

$$A_{cm} = 0$$

Idealne operacione pojačavače karakterišu

beskonačno pojačanje razlike $\Rightarrow V_u = 0 \rightarrow V_+ = V_-$

beskonačna ulazna otpornost $\Rightarrow I_u = 0$

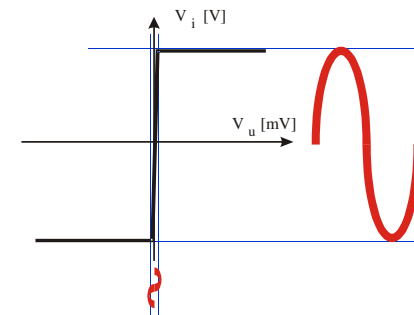
izlazna otpornost jednaka nuli $\Rightarrow V_i \neq f(R_p)$

ne pojačava srednju vrednost $\Rightarrow A_{cm} = 0$

beskonačni propusni opseg \Rightarrow idealne f k-ke

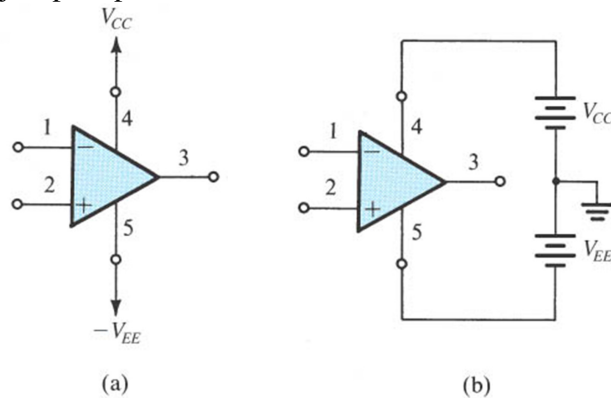
Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



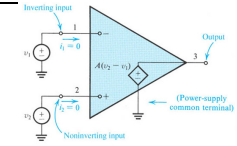
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

17

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 *OpAmpa* (o kome smo do sada govorili) naziva

pojačanje u otvorenoj petlji (Open loop gain)

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

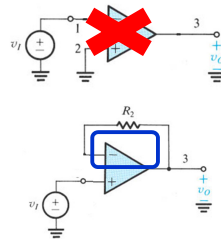
18

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*

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

19

Idealni operacioni pojačavač

Prieri primene OpAmp-a

S obzirom da je pojačanje samog pojačavača u „otvorenoj petlji“ poznato ($A_o \rightarrow \infty$), 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 $v_+ = v_-$.

03. Novembar 2016.

Operacioni pojačavači

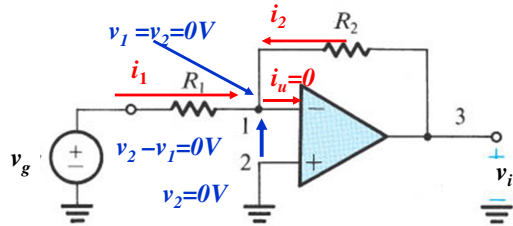
20

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač* –

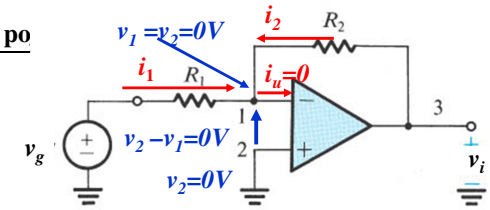
izlazni signal suprotne faze od **ulaznog**

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



Idealni operacioni po

Invertorski pojačavač



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

$$i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1}$$

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

$$\left. \begin{matrix} i_1 = \frac{v_g}{R_1} \\ i_2 = \frac{v_i}{R_2} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \frac{v_i}{R_2} = -\frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_i = -\frac{R_2}{R_1} v_g$$

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

Idealni operacioni pojačavač

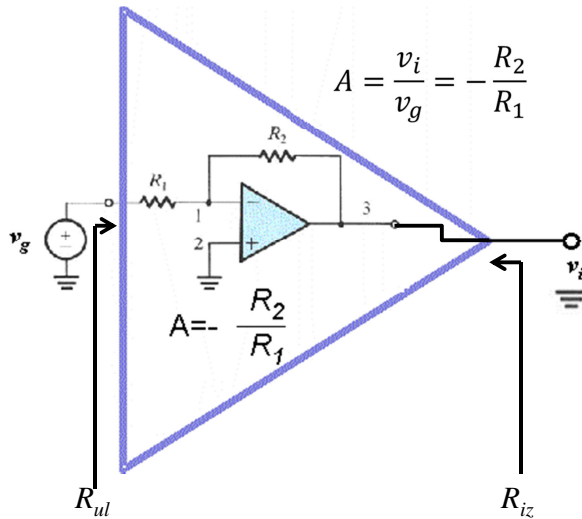
Invertorski pojačavač

osobine

Naponsko pojačanje

Ulazna otpornost

Izlazna otpornost



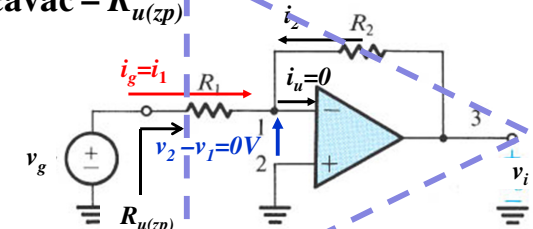
Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{u(zp)}$

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

$$i_g = i_1$$

$$i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1}$$



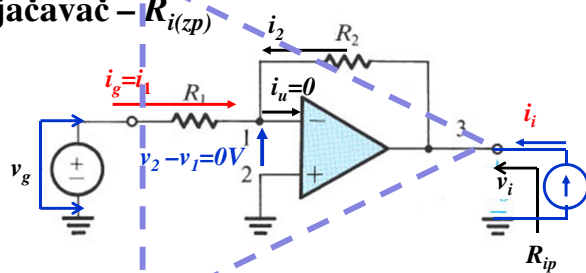
$$\left. \begin{matrix} i_g = i_1 \\ i_1 = \frac{v_g}{R_1} \end{matrix} \right\} \Rightarrow R_{u(zp)} = \frac{v_g}{i_g} = R_1$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{i(zp)}$



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

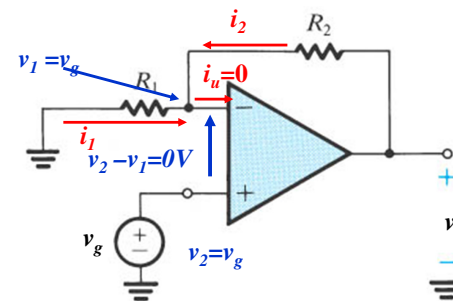
Kod realnih OpAmp, izlazna otpornost pojačavača (u zatvorenoj petlji) manje od sopstvene izlazne otpornosti OpAmpa (u otvorenoj petlji)!!!

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač –

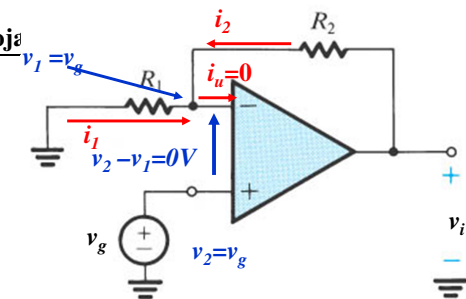
izlazni signal je u fazi sa *ulaznim*

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



Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač



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

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

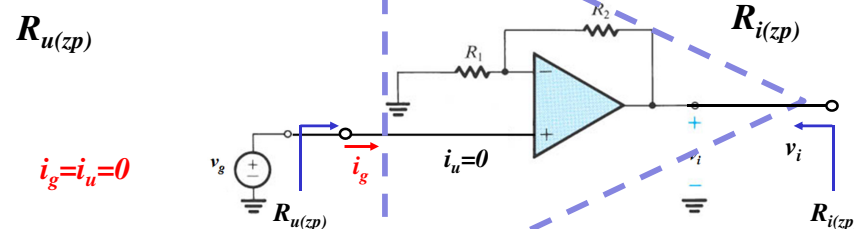
$$i_2 = \frac{v_i - v_g}{R_2}$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -\frac{v_g}{R_1} \\ i_2 &= \frac{v_i - v_g}{R_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_i - v_g}{R_2} = \frac{v_g}{R_1} \Rightarrow v_i = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_g$$

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

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač



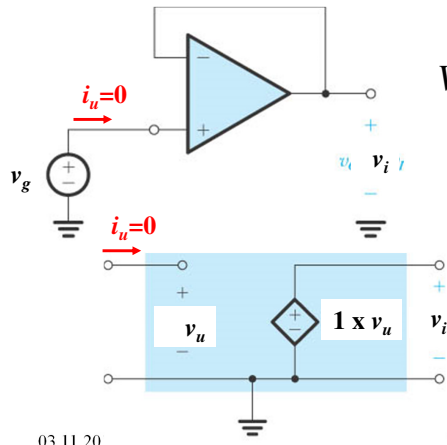
$$i_g = i_u = 0$$

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

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

Neinvertujući pojačavač sa jediničnim pojačanjem -

bafer (buffer)



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

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

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

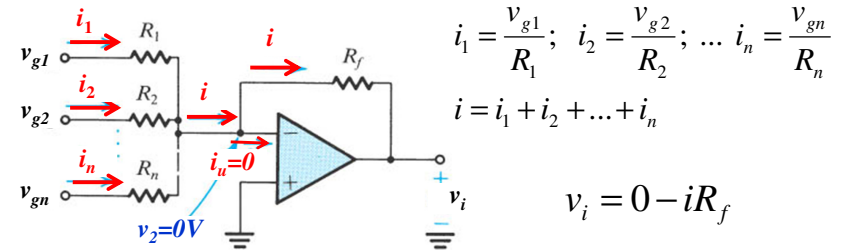
03.11.20

jačavači

(b)

29

Kolo za sabiranje – Weighted Summer



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

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

$$v_i = 0 - iR_f$$

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

03.11.2016.

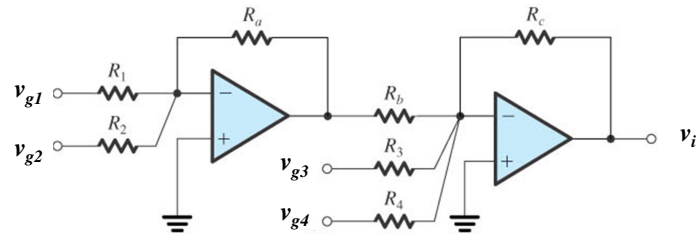
Operacioni pojačavači

30

Domaći 4.2



Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike



03.11.2016.

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

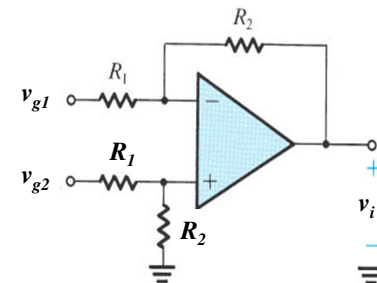
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

31

Diferencijalni balansni pojačavač

Kolo za „oduzimanje“ – pojačavač razlike signala



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

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

32

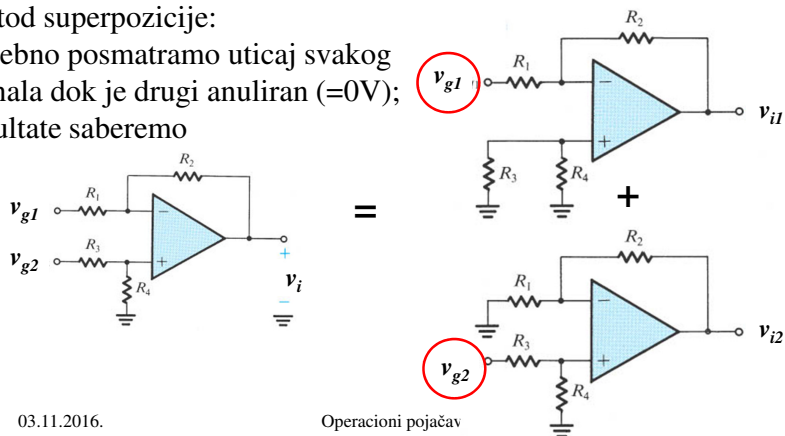
Idealni operacioni pojačavač

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



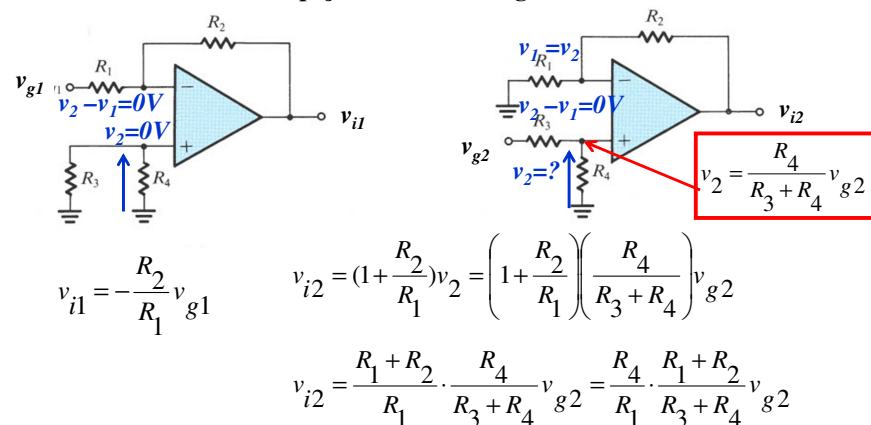
03.11.2016.

Operacioni pojačav

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

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

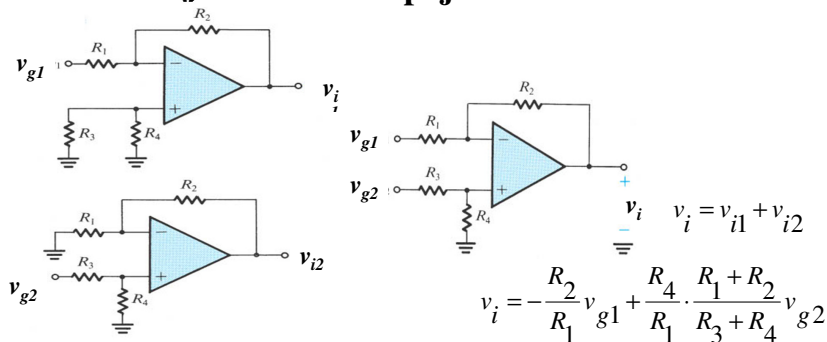


03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač



(b)

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

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

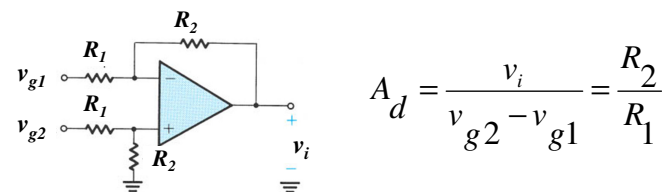
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač –

Diferencijalno pojačanje u zatvorenoj petlji



03.11.2016.

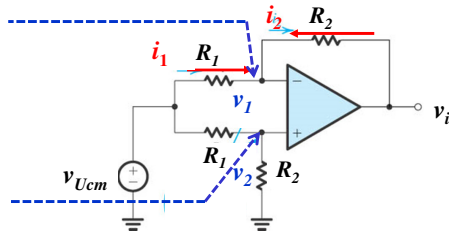
Operacioni pojačavači

Diferencijalni balansni pojačavač –
 A_{cm} u zatvorenoj petlji

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

$$v_1 = v_2$$

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



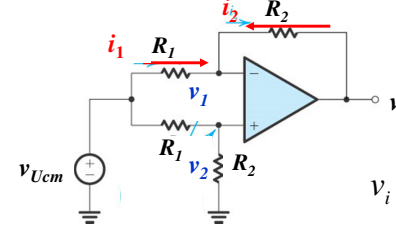
$$i_1 = \frac{1}{R_1} \left[v_{Ucm} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} \right] = \frac{1}{R_1 + R_2} v_{Ucm} = -i_2$$

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

Diferencijalni balansni pojačavač –
 A_{cm} u zatvorenoj petlji

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

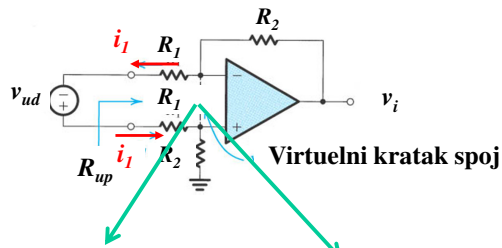
$$v_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} - \left(\frac{1}{R_1 + R_2} v_{Ucm} \right) \cdot R_2 = 0$$



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

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

Diferencijalni balansni pojačavač - R_u



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

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

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

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

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

Diferencijalni balansni pojačavač

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

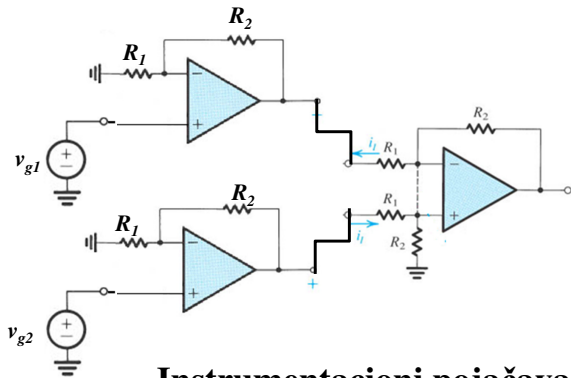
Jedna od njih je merenje: V-metar mora da ima jako veliku ulaznu otpornost da ne bi uticao na napon koji se meri.

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



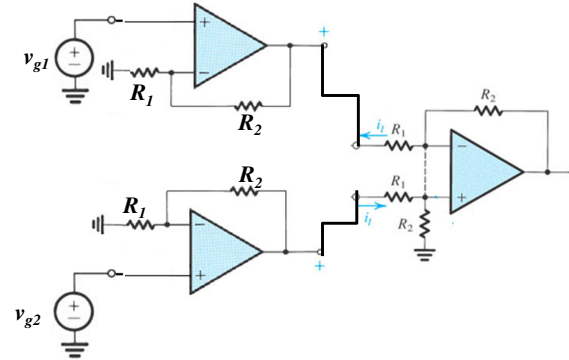
Instrumentacioni pojačavač

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Diferencijalni balansni pojačavač

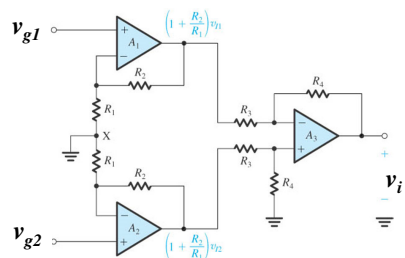
Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?



03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Instrumentacioni pojačavač



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

Povećano pojačanje i ulazna otpornost.

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

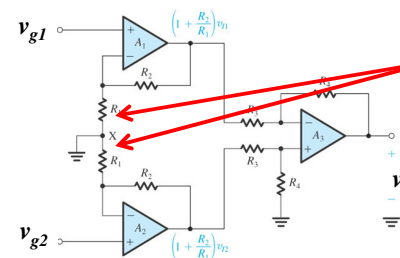
- A_1 i A_2 moraju da budu savršeno upareni 😞

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

03.11.2016.

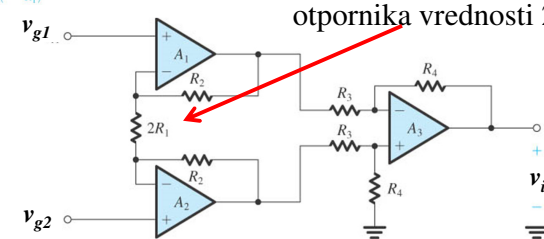
Operacioni pojačavači

Instrumentacioni pojačavač



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

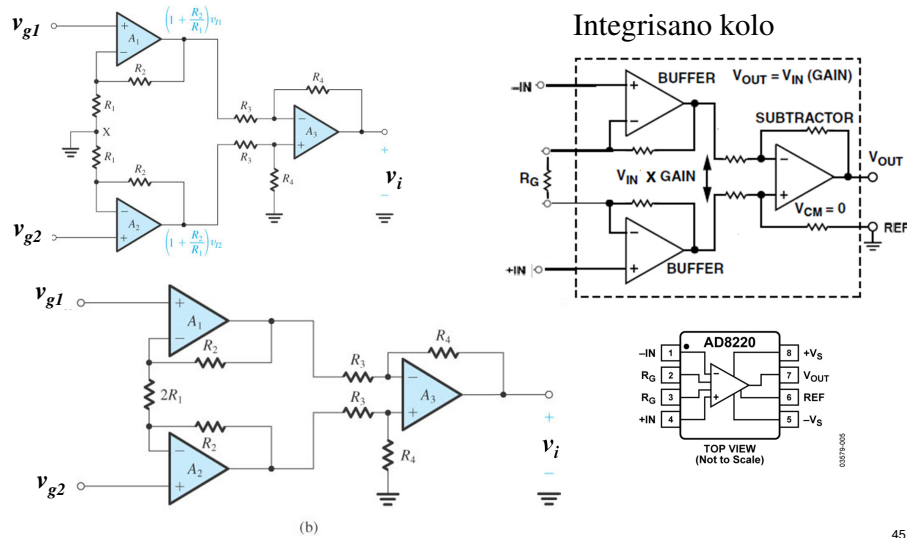
-Kontrola A_d promenom jednog otpornika vrednosti $2R_1$



03. novembar 2015.

Operacioni pojačavači

Instrumentacioni pojačavač

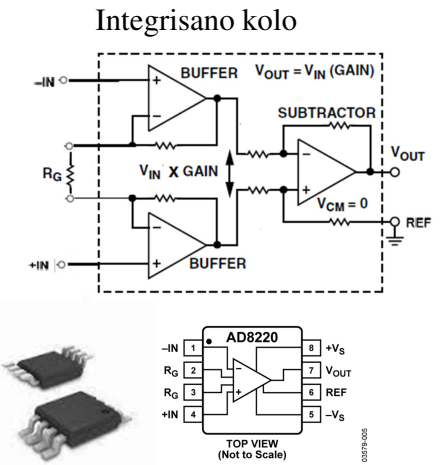


Instrumentacioni pojačavač NIJE isto što i operacioni!

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

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

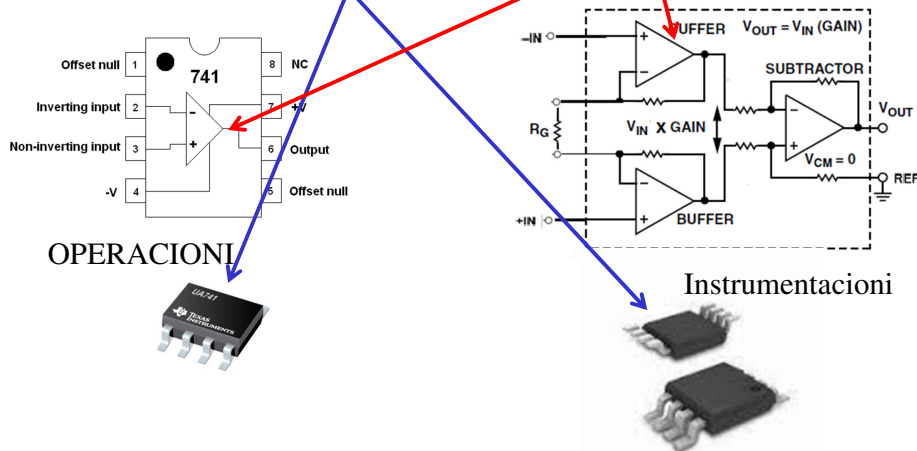
$$G = (49.4k\Omega / R_G) + 1$$



Instrumentacioni pojačavač NIJE isto što i operacioni!

IAKO ISTO IZGLEDAJU U RADNJI!

Integrirano kolo

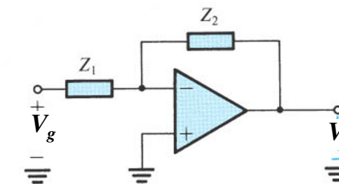


OPERACIONI

Instrumentacioni

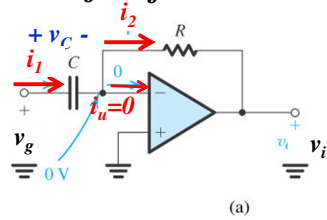
Invertujući pojačavač sa impedansama –

A(s) u zatvorenoj petlji (ZP)



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

Kolo za diferenciranje – f karakteristika



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

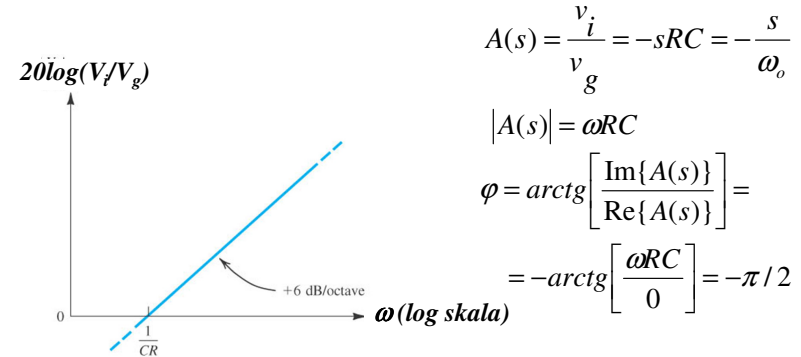
$$i_2 = \frac{0 - v_i}{R} = -\frac{v_i}{R}$$

$$i_1 = i_2$$

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

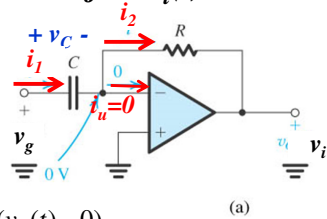
$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -s \cdot R \cdot C = -\frac{s}{\omega_o}$$

Kolo za diferenciranje – f karakteristika



Ponaša se kao VF filter sa graničnom frekvencijom u beskonačnosti

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



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

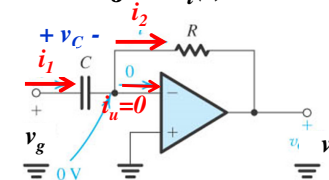
$$i_1(t) = C \frac{dv_g(t)}{dt}$$

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

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

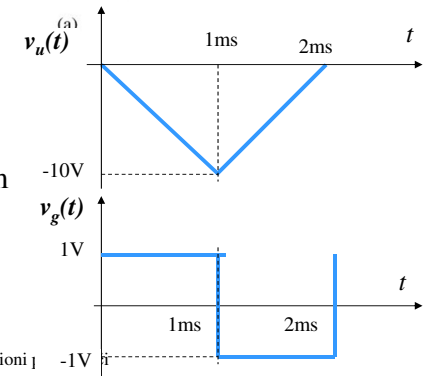
$$C \frac{dv_g(t)}{dt} = -\frac{v_i(t)}{R} \Rightarrow v_i(t) = -RC \frac{dv_g(t)}{dt}$$

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$

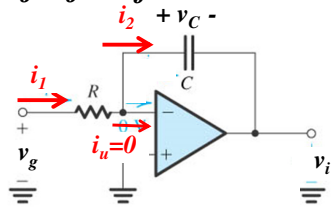


$$v_i = -RC \frac{dv_g}{dt}$$

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:



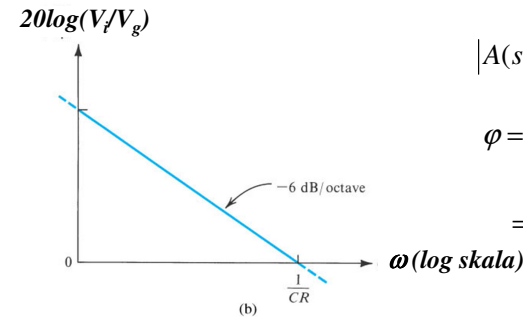
Kolo za integraljenje – f karakteristika



$$\left. \begin{aligned}
 i_1 &= \frac{(v_g - 0)}{R} = \frac{v_g}{R} \\
 i_2 &= \frac{0 - v_i}{Z_C} = -\frac{v_i}{1/j\omega C} = -j\omega C v_i = -sC v_i \\
 i_1 &= i_2
 \end{aligned} \right\} \frac{v_g}{R} = -sC v_i \Rightarrow v_i = -\frac{1}{RCs} v_g$$

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

Kolo za integraljenje – f karakteristika



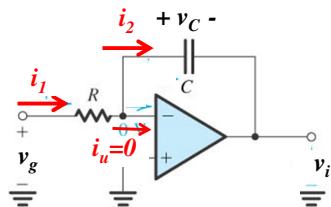
$$A(s) = -\frac{1}{sRC} = -\frac{\omega_o}{s} = -\frac{\omega_o}{j\omega} = j \frac{\omega_o}{\omega}$$

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

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

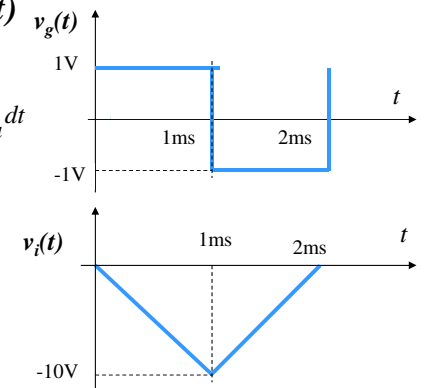
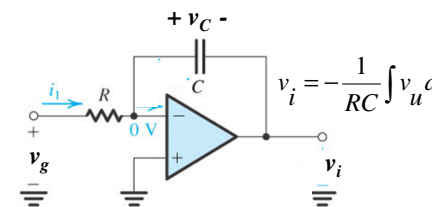
Ponaša se kao NF filter sa graničnom frekvencijom u nuli

Kolo za integraljenje - v_i(t)



$$\left. \begin{aligned}
 i_1(t) &= \frac{v_g(t) - 0}{R} = \frac{v_g(t)}{R} \\
 i_2(t) &= C \frac{dv_C(t)}{dt} = C \frac{d(0 - v_i(t))}{dt} \\
 i_1(t) &= i_2(t)
 \end{aligned} \right\} \frac{v_g(t)}{R} = -C \frac{dv_i(t)}{dt} \Rightarrow v_i(t) = -\frac{1}{RC} \int v_g(t) dt$$

Kolo za integraljenje - v_i(t)



R=10k
C=10nF

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

Zašto "Operacioni"?

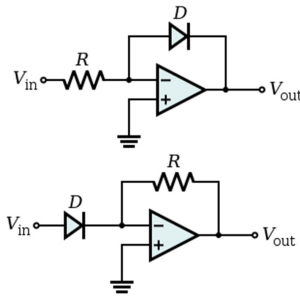


Mogu da se koriste za različite računске OPERACIJE

- Sabiranje,
- Oduzimanje
- Diferenciranje
- Integraljenje
- Logaritmovanje,

ali i

- Antilogaritmovanje
- Množenje
- Deljenje



03.11.2016.

Operacioni pojačavači

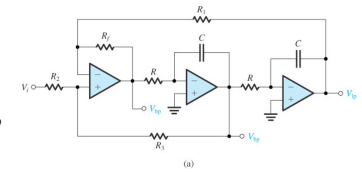
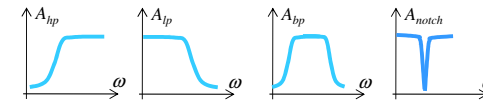
57

Idealni operacioni pojačavač

Pored toga

Mogu da se koriste za različite druge korisne primene

- Aktivni filtri



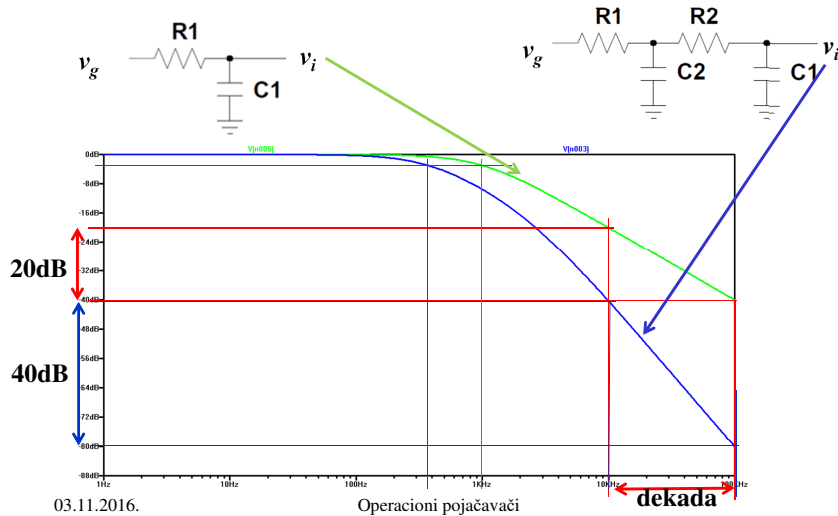
- Komparatori
- Precizni usmerači
- Oscilatori (biće obrađeni kasnije u okviru kursa)

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

58

Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)



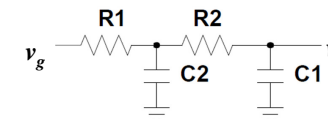
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

59

Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)

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



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

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

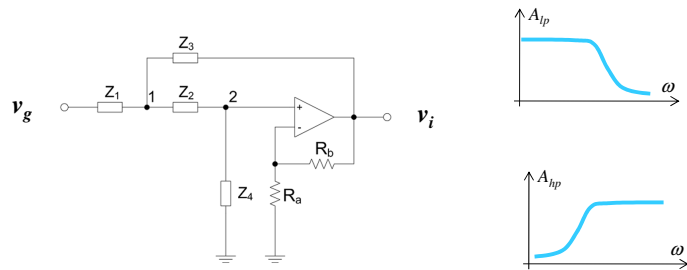
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

60

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key konfiguracija)

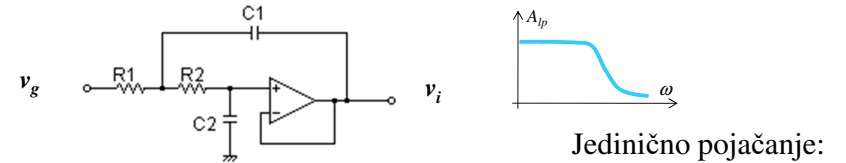


<http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php>

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

Idealni operacioni pojačavač

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



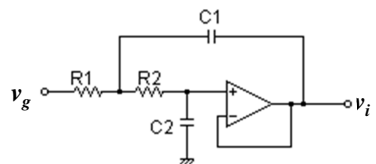
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1}\right)s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2)s + 1}$$

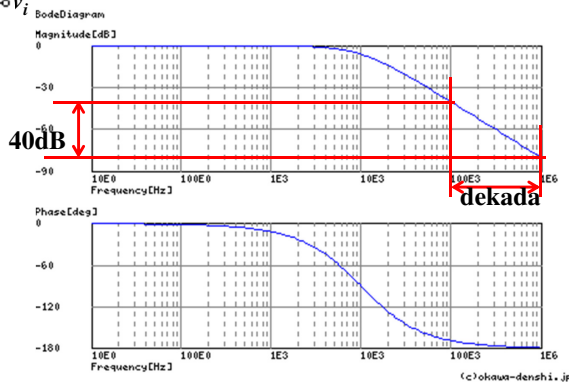
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key LP konfiguracija) NF

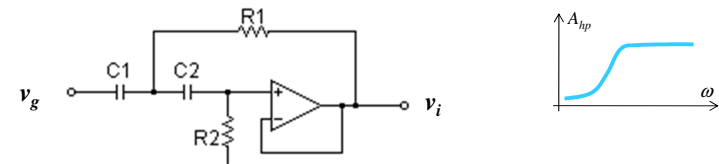


$R_1 = R_2 = 16\text{k}\Omega$
 $C_1 = C_2 = 0.001\mu\text{F}$
 $f_c = 10\text{kHz}$



Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF

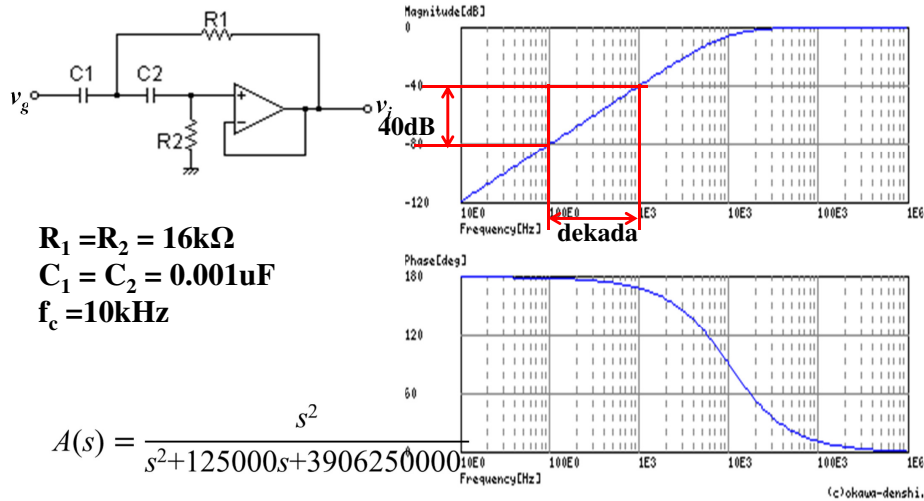


$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{s^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right)s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF

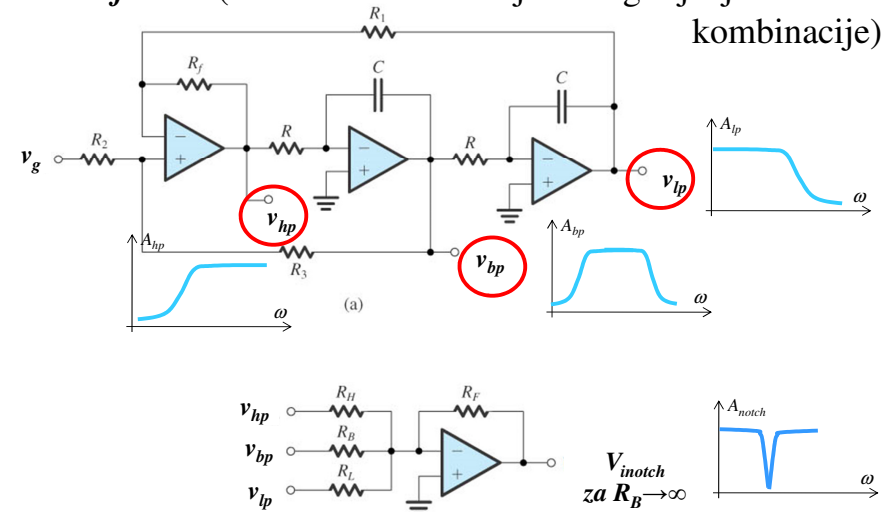


03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

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

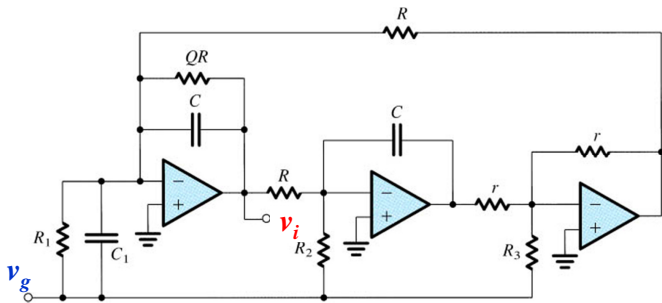


03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri



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

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

Da se podsetimo:

idealne operacione pojačavače karakterišu

- beskonačno pojačanje razlike $\Rightarrow V_u=0 \rightarrow V_+=V_-$
- beskonačna ulazna otpornost $\Rightarrow I_u=0$
- izlazna otpornost jednaka nuli $\Rightarrow V_i \neq f(R_p)$
- ne pojačava srednju vrednost $\Rightarrow A_{cm}=0$
- beskonačni propusni opseg \Rightarrow idealne f k -ke

03.11.2016.

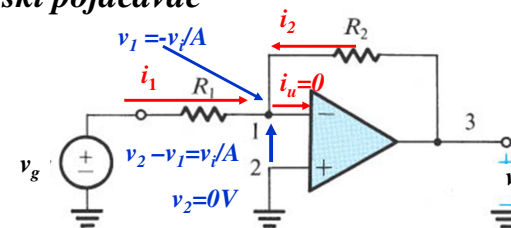
Operacioni pojačavači

Realne operacione pojačavače karakterišu

- pojačanje nije beskonačno $\Rightarrow V_u = V_i / A$
- ulazna otpornost konačna $\Rightarrow I_u \neq 0$
- izlazna otpornost konačna $\Rightarrow V_i = f(R_p)$
- pojačava srednju vrednost $\Rightarrow A_{cm} \neq 0$
- propusni opseg konačan \Rightarrow realne f k-ke

Efekti konačnog pojačanja

Invertorski pojačavač



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

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

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

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



Domaći 4.1

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 zatvorenoj petlji promeni se samo za 0.9% (sa 99V/V na 99.9V/V)

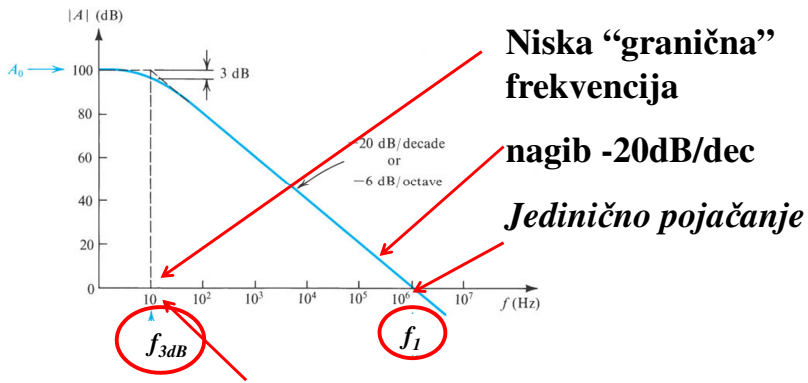
Da li je to dobro?



Realni operacioni pojačavač

Efekte konačnog propusnog opsega (otvorena petlja)

Realna amplitudna karakteristika (opamp 741)



Jedan dominantan pol

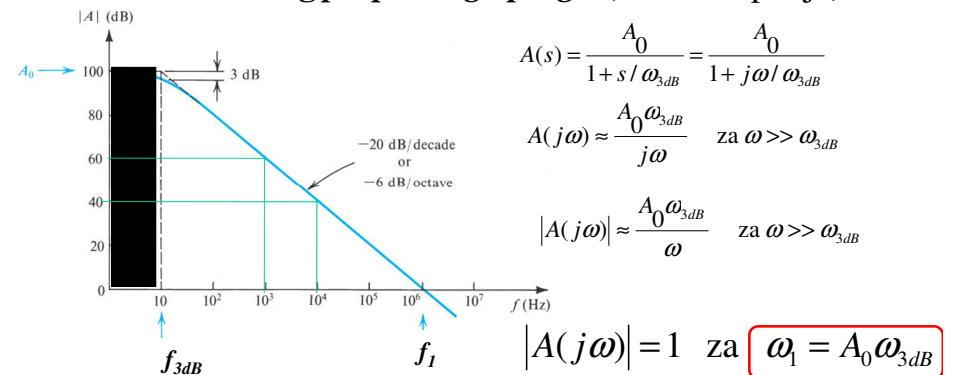
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

73

Realni operacioni pojačavač

Efekte konačnog propusnog opsega (otvorena petlja)



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

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

Operacioni pojačavači

03.11.2016.

74

Realni operacioni pojačavač

Efekte 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)**

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

75

Realni operacioni pojačavač

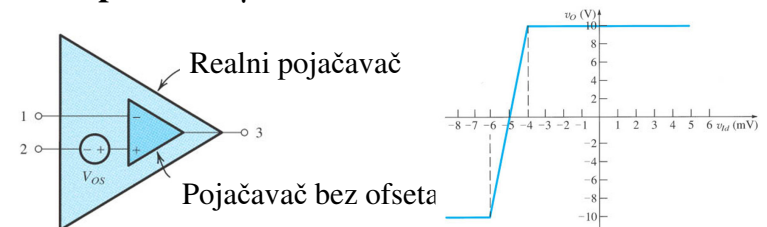
Ostala ograničenja – naponski ofset (razdešenost) offset

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.

Zavisí od temperature $\mu V/^\circ C$

Model:



03.11.2016.

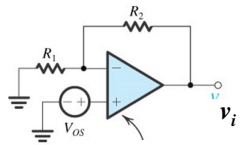
Operacioni pojačavači

76

Realni operacioni pojačavač

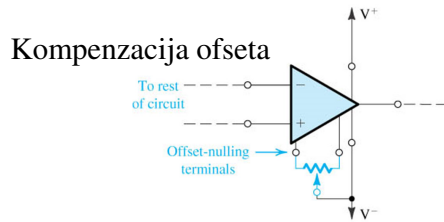
Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset*

Uticaj naponskog ofseta na invertujući i neinvertujući pojačavač je identičan:

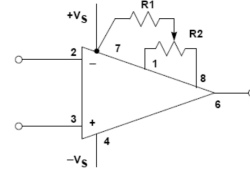


Pojačavač bez ofseta

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



OP177/AD707 OFFSET ADJUSTMENT PINS



- R1 = 10kΩ, R2 = 2kΩ, OFFSET ADJUST RANGE = 200μV
- R1 = 0, R2 = 20kΩ, OFFSET ADJUST RANGE = 3mV

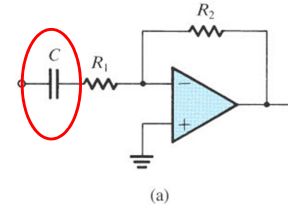
03.11.2016.

Operacion

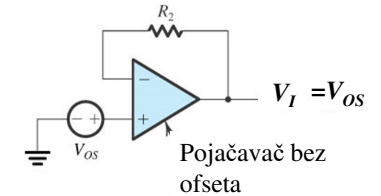
Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – *naponski ofset (razdešenost) offset*
Smanjenje uticaja ofseta kod invertujućeg pojačavača.

Primenljivo samo za VF signale

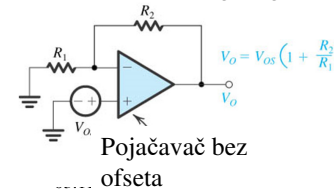


(a)



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

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

Operacioni pojačavači

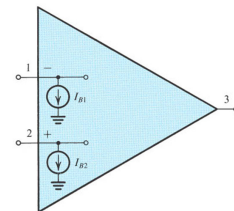
Realni operacioni pojačavač

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



Pojačavač bez ofseta

I strujni ofset (*input offset current*) kao

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

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

Realni operacioni pojačavač

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

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

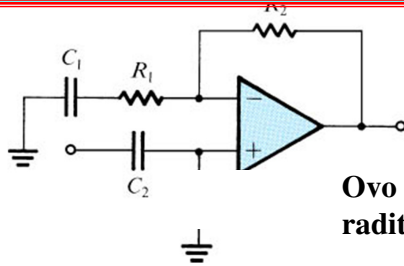
03.11.2016.

Operacioni pojačavači

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!!!

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

81

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)

03.11.2016.

Operacioni pojačavači

82

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

03.11.2016.

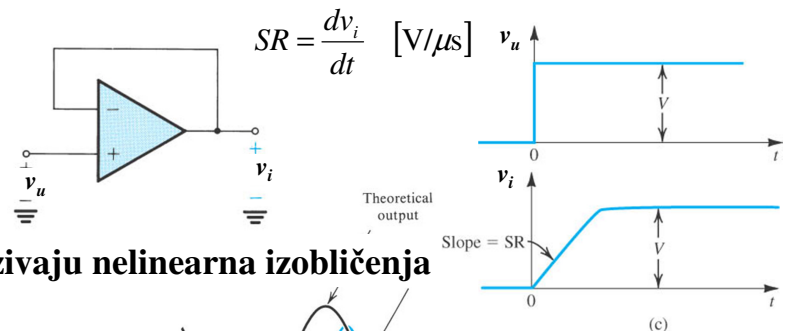
Operacioni pojačavači

83

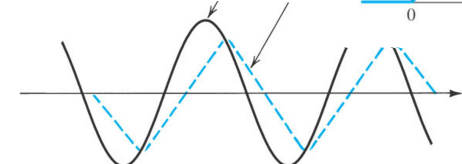
Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – slew rate

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu



Izazivaju nelinearna izobličenja



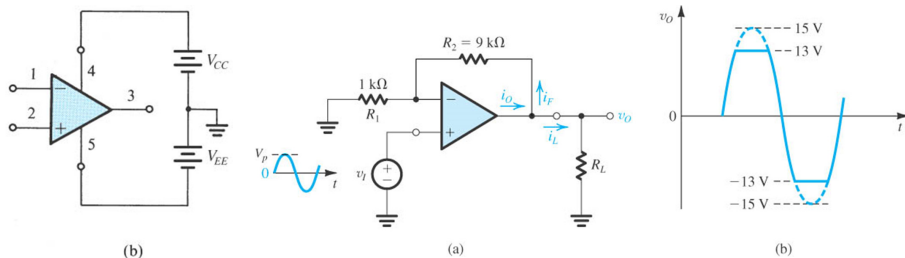
03.11.2016.

84

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponsko zasićenje

Uvek je manje od +/- napon napajanja



Ako je $V_{CC} = \pm 15V$

Rated output voltage = $\pm 13V$

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujno zasićenje

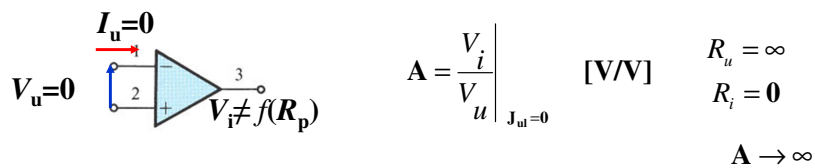
Maksimalna izlazna struja je ograničena.

Za 741 iznosi $\pm 20mA$

Voditi računa pri projektovanju!

Idealni operacioni pojačavač

Više o OpAmp u okviru kursa “Analogna elektronika”



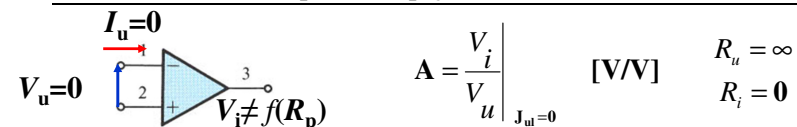
do tada – UPAMTITI osobine

beskonačno pojačanje $\Rightarrow V_u=0 \rightarrow V_+ = V_-$

beskonačna ulazna otpornost $\Rightarrow I_{ul}=0$

izlazna otpornost jednaka nuli $\Rightarrow V_{iz} \neq f(R_p)$

Idealni operacioni pojačavač



do tada – UPAMTITI osobine

beskonačno pojačanje $\Rightarrow V_u=0 \rightarrow V_+ = V_-$

beskonačna ulazna otpornost $\Rightarrow I_{ul}=0$

izlazna otpornost jednaka nuli $\Rightarrow V_{iz} \neq f(R_p)$

ne pojačava srednju vrednost $\Rightarrow A_{cm}=0$
Ne pojačava DC

beskonačni propusni opseg \Rightarrow idealne f k-ke
(prošla nedelja)

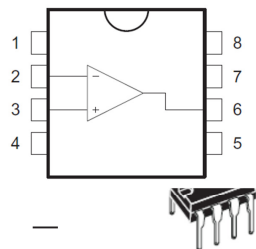
UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

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

- pojačanje nije beskonačno $\Rightarrow V_u = V_i / A$
- ulazna otpornost konačna $\Rightarrow I_u \neq 0$
- izlazna otpornost konačna $\Rightarrow V_i = f(R_p)$
- pojačava srednju vrednost $\Rightarrow A_{cm} \neq 0$
- propusni opseg konačan \Rightarrow realne f k-ke, uzan BW za otvorenu petlju

UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

2. Naponska razdešenost (V_{offset}) $1mV < V_{OS} < 5mV$
3. Struja polarizacije (I_{bias}) $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100nA$
4. Strujna razdešenost (I_{offset}) $I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \leq 10nA$
5. Potiskivanje napona napajanja $PSR = 20 \log \left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d} \right] \leq 90dB$
6. Slew rate $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1 V/\mu s$
7. Naponsko zasićenje $\pm |V_{CC} - 2V|$
8. Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) $\sim x10mA$



- 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:

Kataložki podaci za

ELECTRICAL CHARACTERISTICS					
$V_{CC} = \pm 15V, T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)					
Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5	mV
I_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30	nA
I_{ib}	Input Bias Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100	nA
A_{vo}	Large Signal Voltage Gain ($V_o = \pm 10V, R_L = 2k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77	90		dB
I_{CC}	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8	mA
V_{cm}	Input Common Mode Voltage Range $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		±12	±12	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70	90		dB
I_{OS}	Output Short-circuit Current	10	25	40	mA
$\pm V_{app}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $R_L = 10k\Omega$ $R_L = 2k\Omega$ $R_L = 10k\Omega$ $R_L = 2k\Omega$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		12	14	V
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain	0.25	0.5		V/ μs
t_r	Rise Time $V_i = \pm 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain		0.3		μs
K_{ov}	Overshoot $V_i = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain		5		%
R_i	Input Resistance	0.3	2		M Ω
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_o = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, T_{amb} = +25^\circ C$		0.06		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_S = 100\Omega$		23		nV/ \sqrt{Hz}
ϕ_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 (26.11.2016.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2017.)	50%	20%

	120%	60%



Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izadite 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.
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

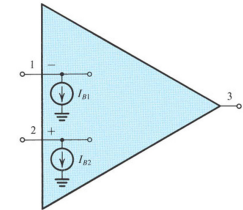
(Osnovni jednostepeni pojačavači sa BJT)

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Razlika struja polarizacije naziva se struni ofset ili strujna razdešenost.

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

input offset current



Pojačavač bez ofseta

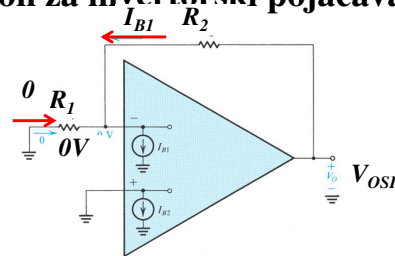
Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

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

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

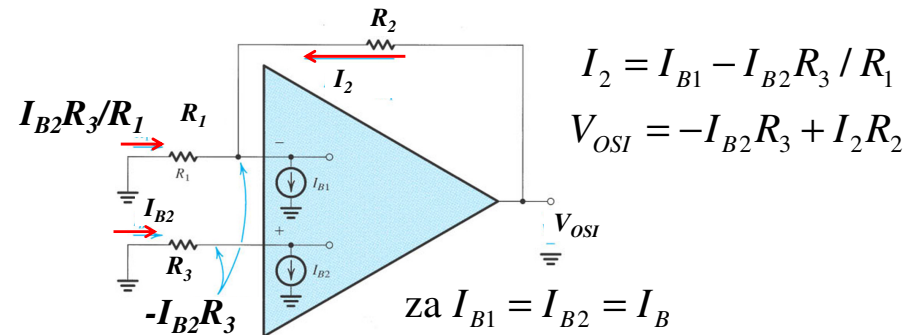
Ranije je rečeno da veća ulazna otpornost zahteva veće R_1 , a da bi se održalo pojačanje, mora i R_2 da se poveća.

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



Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Uticaj strujnog ofseta može da se umanjí vezivanjem R_3



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

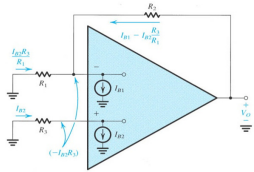
$$V_{OSI} = -I_{B2}R_3 + I_2R_2$$

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

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

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 $I_{B2} = I_B - I_{OS} / 2$

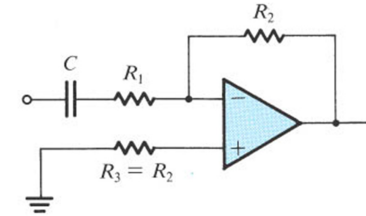
$$V_{OSI} = I_{OS} R_2$$

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

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 $R_3 = R_2$