


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


25. oktobar 2018. Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Sadržaj

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači

Operacioni pojačavači



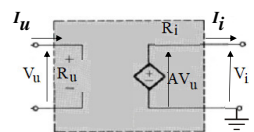
Zašto “Operacioni”?

3

Da se podsetimo

Operacioni pojačavač po karakteristikama liči na idelani naponski pojačavač

Naponski



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

Idealni

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači

Idealni operacioni pojačavač

Naponski

Idealni

$A = \frac{V_i}{V_u} \Big|_{I_u=0}$ [V/V]

$R_u = \infty$

$R_i = 0$

$A \rightarrow \infty$

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

$V_u = 0$

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 5

Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 6

Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 7

Idealni operacioni pojačavač

Idealna prenosna karakteristika

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 8

da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač

Naponski

Idealni

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

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

$R_u \rightarrow \infty \Rightarrow I_u = 0 \text{ A}$

Pojačavači koji imaju beskonačnu ulaznu otpornost:

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

Ne opterećuju prethodni stepen!!!

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 9

da se podsetimo

Idealni operacioni pojačavač

Naponski

Pojačavači koji imaju izlaznu otpornost jednaku nuli

Idealni

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

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

$R_i = 0 \Rightarrow V_i = \frac{R_p}{R_i + R_p} V_o = V_o = AV_u$

$V_i \neq f(R_p)$

Pojačavači koji imaju nultu izlaznu otpornost:

Izlazni napon ne zavisi od otpornosti potrošača!!!

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 10

Idealni operacioni pojačavač

Simbol operacionog pojačavača

Invertujući ulaz (1)
 Neinvertujući ulaz (2)
 Izlaz (3)

Dva ulazna priključka neinvertujući “+” i invertujući “-” ulaz

Jedan izlazni priključak

Šta operacioni pojačavač pojačava kad ima dva ulaza?

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 11

Idealni operacioni pojačavač

Treba da pojačava razliku signala

na neinvertujućem “+” i invertujućem “-” ulazu

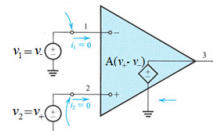
$v_u = v_d = v_+ - v_-$

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

25. oktobar 2018. 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:

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

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

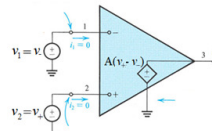
Želimo samo pojačanje razlike signala na izlazu (šumovi)

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 13

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

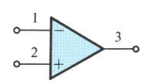
$A = A_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \quad v_+ - v_- = 0 \quad v_+ = v_-$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 14

Idealni operacioni pojačavač



$A = \frac{v_i}{v_u} \Big|_{i_u=0} \quad [V/V] \quad R_u = \infty$
 $R_i = 0$
 $A_{cm} = 0$

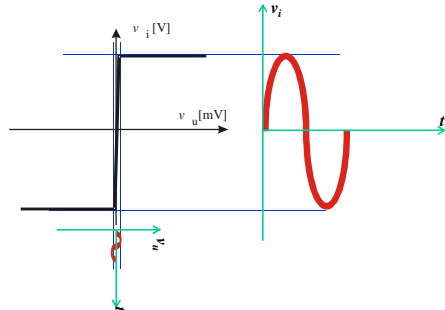
Idealne operacione pojačavače karakterišu

- 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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 15

Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 16

Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a

(a) (b)

25. oktobar 2018. 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)

25. oktobar 2018. 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*

25. oktobar 2018. 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 **$v_+ = v_-$** .

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 20

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač* –

izlazni signal suprotne faze od ulaznog

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 21

Idealni operacioni po

Invertorski pojačavač

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

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

$$i_2 = \frac{v_i - v_2}{R_2} = \frac{v_i - 0V}{R_2} = \frac{v_i}{R_2}$$

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

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 22

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 23

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 24

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 25

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 26

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 27

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

osobine

- Naponsko pojačanje
- Ulazna otpornost
- Izlazna otpornost

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

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 28

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{u(zp)}$

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

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

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

**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**

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 29

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)!!!

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 30

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač –

izlazni signal je u fazi sa ulaznim

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 31

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

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

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

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

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 32

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

.lib opamp.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 33

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

.lib opamp.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 34

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

.lib UniversalOpamps2.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 35

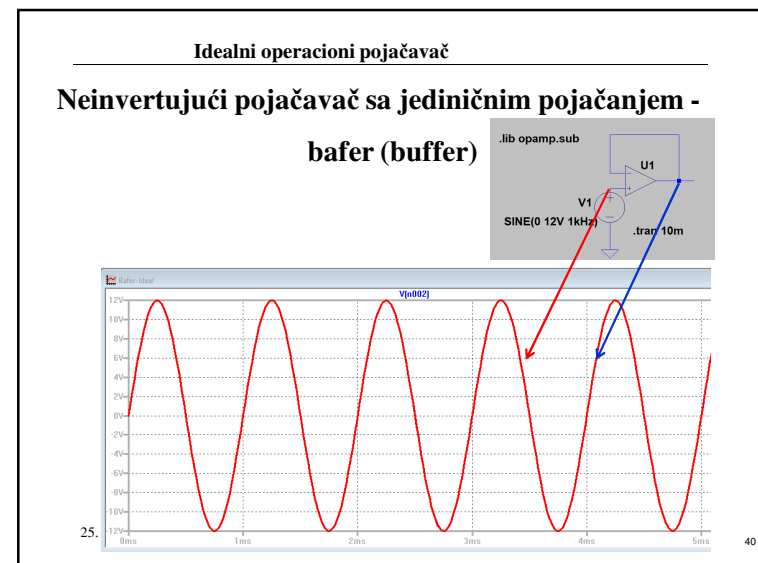
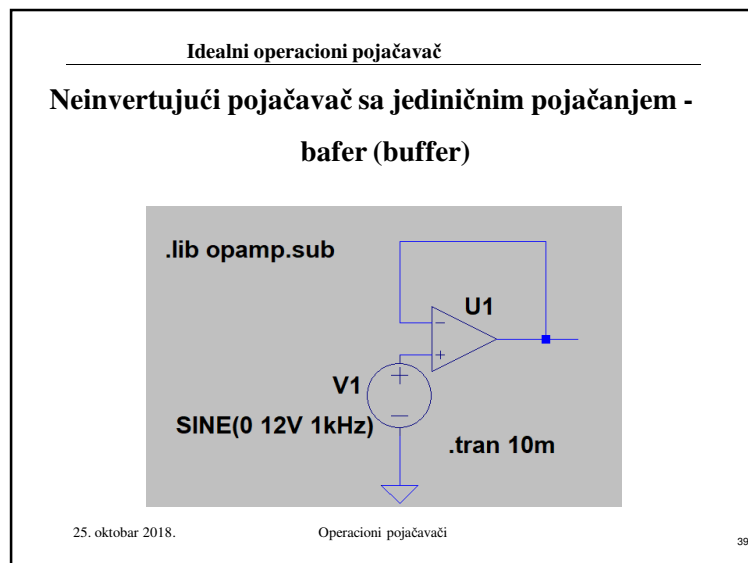
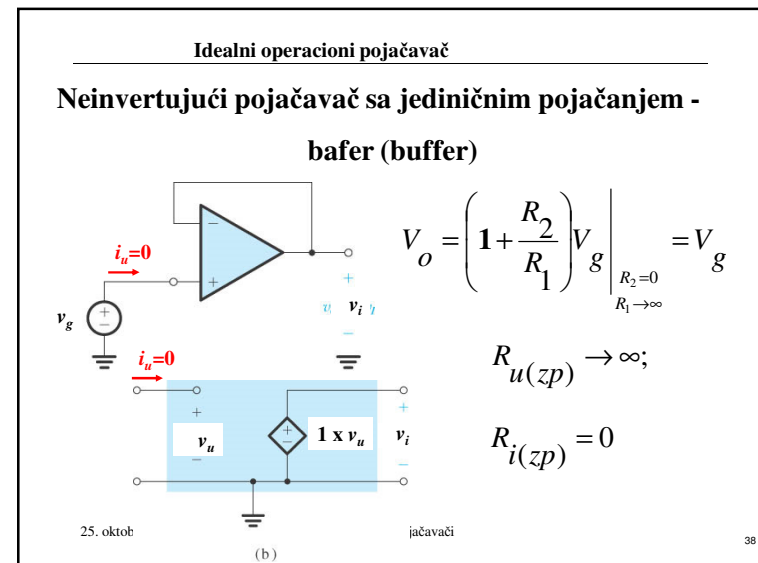
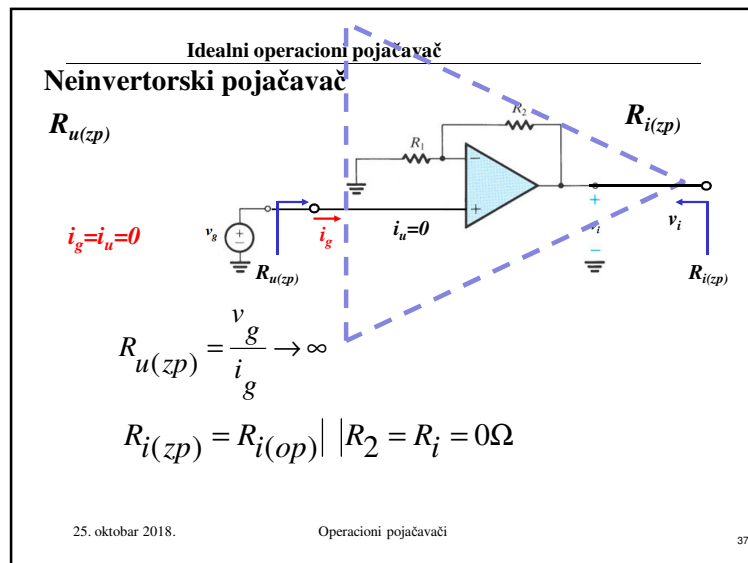
Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

.lib UniversalOpamps2.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 36



Idealni operacioni pojačavač

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

.lib UniversalOpamps2.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 41

Idealni operacioni pojačavač

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

.lib opamp.sub

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 42

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za sabiranje – Weighted Summer

$i_1 = \frac{v_{g1}}{R_1}; i_2 = \frac{v_{g2}}{R_2}; \dots i_n = \frac{v_{gn}}{R_n}$
 $i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$
 $v_i = 0 - iR_f$

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

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 43

Idealni operacioni pojačavač

Domaći 4.1

Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike

Treća nedelja

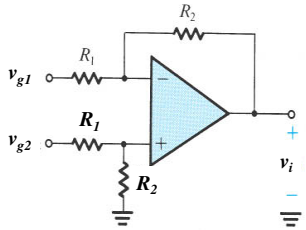
$$v_i = \frac{R_a R_c}{R_1 R_b} v_{g1} + \frac{R_a R_c}{R_2 R_b} v_{g2} - \frac{R_c}{R_3} v_{g3} - \frac{R_c}{R_4} v_{g4}$$

25. oktobar 2018. Operacioni pojačavači 44

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

Kolo za „oduzimanje“ – pojačavač razlike signala na generatorima



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

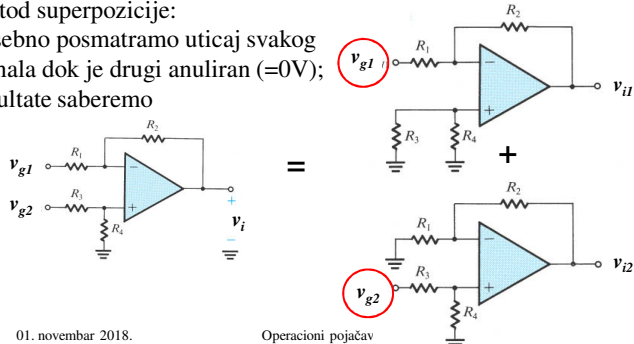
01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 45

Za one koji žele da nauče više

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

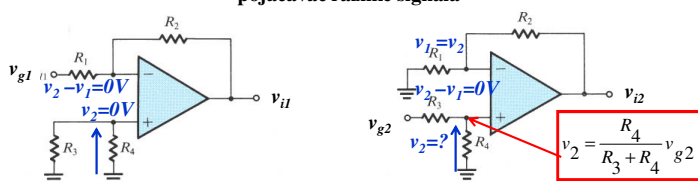


01. novembar 2018. Operacioni pojačav 46

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

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



$$v_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{g2}$$

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

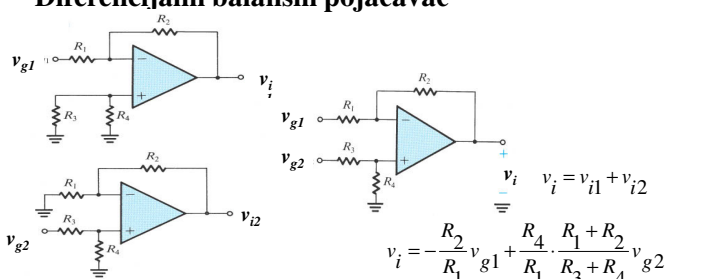
$$v_{i2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{g2}$$

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 47

Za one koji žele da nauče više

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

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

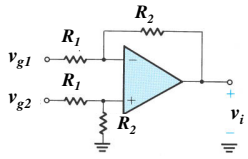
$$v_i = \frac{R_2}{R_1} (v_{g2} - v_{g1})$$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 48

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

**Diferencijalni balansni pojačavač –
Diferencijalno pojačanje u zatvorenoj petlji**



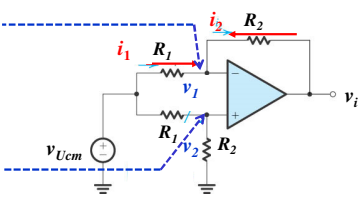
$$A_d = \frac{v_i}{v_{g2} - v_{g1}} = \frac{R_2}{R_1}$$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 49

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

**Diferencijalni balansni pojačavač –
 A_{cm} u zatvorenoj petlji**



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

$$v_1 = v_2$$

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

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

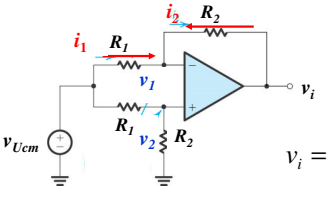
$$v_i = v_1 + i_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{Ucm} + i_2 R_2$$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 50

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

**Diferencijalni balansni pojačavač –
 A_{cm} u zatvorenoj petlji**



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

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

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

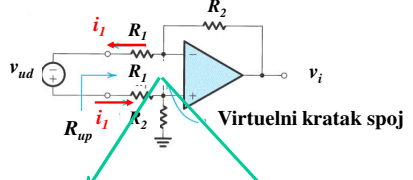
$$A_{cm} = \frac{v_i}{v_{Ucm}} = 0$$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 51

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač - R_u



Virtualni kratak spoj

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

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 52

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? 🤔

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 53

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću? 🤔

Instrumentacioni pojačavač

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 54

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću? 🤔

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 55

Idealni operacioni pojačavač

Instrumentacioni pojačavač

Neinvertujući pojačavači kao buferi 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 😞

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 56

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

Za one koji žele da nauče više

-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 57

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

Integrirano kolo

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 58

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

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

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

Integrirano kolo

Integrirano kolo

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 59

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

NIJE isto što i operacioni!

IAKO ISTO IZGLEDAJU U RADNJI!

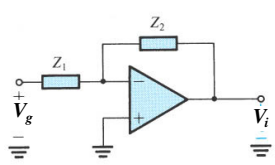
Integrirano kolo

Integrirano kolo

OPERACIONI Instrumentacioni

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 60

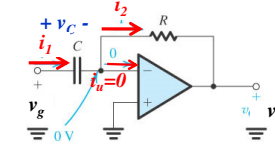
Idealni operacioni pojačavač
Invertujući pojačavač sa impedansama –
 $A(s)$ u zatvorenoj petlji (ZP)



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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 61

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje – f karakteristika



diferenciranje?

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

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

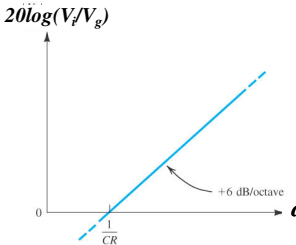
$$i_1 = i_2$$

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 62

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje – f karakteristika



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

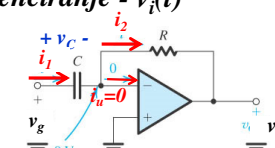
$$|A(s)| = \omega RC$$

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

Ponaša se kao VF filter sa graničnom frekvencijom u beskonačnosti

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 63

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



diferenciranje?

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

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

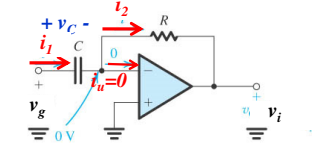
$$i_1(t) = i_2(t)$$

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 64

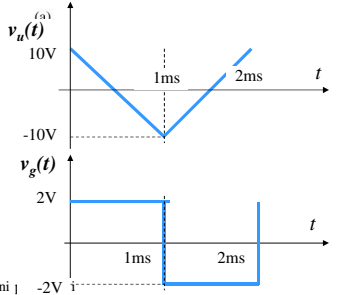
Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje - $v_i(t)$



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

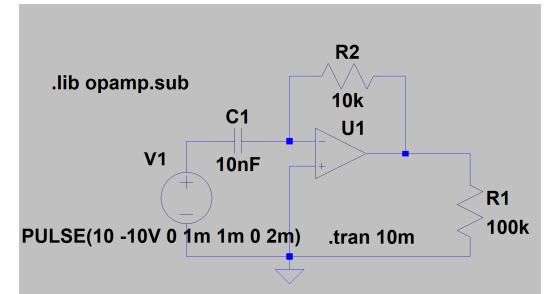
Kako će izgledati talasni oblik napona na izlazu kola za diferenciranje sa $R=10k$ i $C=10nF$ ako se pobudi trougaonim talasnim impulsima sa slike:



01. novembar 2018. Operacioni | 65

Idealni operacioni pojačavač

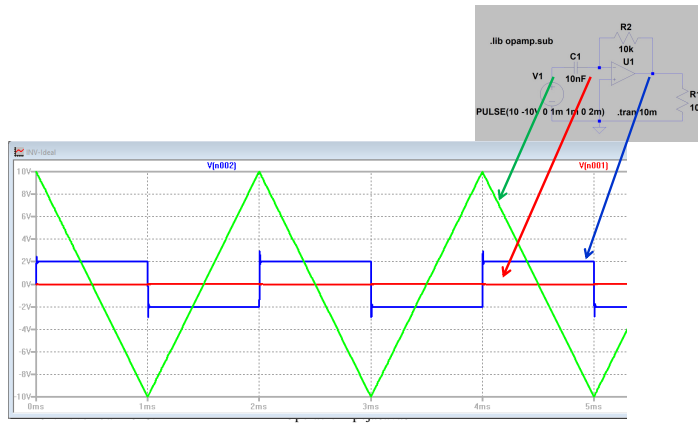
Kolo za diferenciranje



01. novembar 2018. Operacioni pojačavači | 66

Idealni operacioni pojačavač

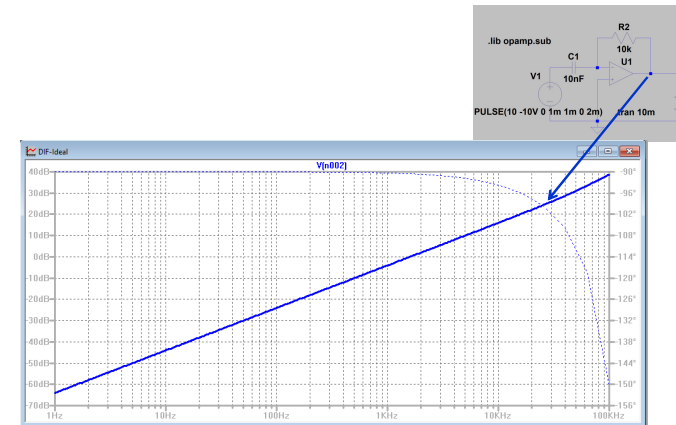
Kolo za diferenciranje



01. novembar 2018. 67

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za diferenciranje



01. novembar 2018. 68

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika

integraljenje?

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 69

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika

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

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

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

Ponaša se kao NF filter sa graničnom frekvencijom u nuli

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 70

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - v_i(t)

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 71

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - v_i(t)

R=10k
C=10nF

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 72

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 73

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 74

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 75

Zašto "Operacioni"?

Mogu da se koriste za različite računске OPERACIJE

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

ali i

- Antilogaritmovanje
- Množenje
- Deljenje

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 76

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)

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 77

Za one koji žele da nauče više

Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 78

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)

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 79

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>

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 80

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

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

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

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 81

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key LP konfiguracija) NF

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 82

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 83

Za one koji žele da nauče više

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 84

Idealni operacioni pojačavač

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

(a)

01. novembar 2018. 85

Idealni operacioni pojačavač

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 86

Idealni operacioni pojačavač

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 87

Idealni operacioni pojačavač

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 88

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 89

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 90

Realni operacioni pojačavač

Realne operacione pojačavače karakterišu

- pojačanje nije beskonačno $\Rightarrow v_u \neq v_i / A$
- 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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 91

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog pojačanja

Invertorski pojačavač

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

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 92

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog pojačanja
Invertorski pojačavač

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 93

Realni operacioni 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:

- Pojačanje u zatvorenoj petlji
- Procentualnu promenu pojačanja u zatvorenoj petlji u odnosu na slučaj sa idealnim OpAmpom
- 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)

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 94

Realni operacioni pojačavač

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?

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 95

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog propusnog opsega (otvorena petlja)

Realna amplitudna karakteristika (opamp 741)

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 96

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog propusnog opsega (otvorena petlja)

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

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

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

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 97

Realni operacioni pojačavač

Efekti konačnog propusnog opsega (zatvorena petlja)

Invertorski pojačavač

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

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 98

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: $1\text{mV} < V_{OS} < 5\text{mV}$.

Zavisi od temperature $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Model:

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 99

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponski ofset (razdešenost) offset

Uticaj naponskog ofseta na invertujući i neinvertujući pojačavač je identičan:

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

Kompencija ofseta

01. novembar 2018. Operacion 100

Realni operacioni pojačavač

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

Primenljivo samo za VF signale

(a)

Pojačavač bez ofseta
 $V_I = V_{OS}$

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

Pojačavač bez ofseta
 $V_o = V_{OS} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

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

Operacioni pojačavači 101

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 102

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – struja polarizacije i strujni ofset (razdešenost)

Način kompenzacije strujnog ofseta objašnjen je u *Dodatku*

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 103

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!!!

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 104

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)*

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 105

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 106

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – slew rate

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

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

Izazivaju nelinearna izoblješnja

01. novembar 20 107

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – slew rate

Predstavlja maksimalnu brzinu promene napona na izlazu

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 108

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponsko zasićenje

Uvek je manje od +/- napon napajanja

Ako je $V_{CC} = \pm 15V$
Rated output voltage = $\pm 13V$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 109

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujno zasićenje

Maksimalna izlazna struja je ograničena.

Za 741 iznosi $\pm 20mA$

Voditi računa pri projektovanju!

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 110

Idealni operacioni pojačavač

Više o OpAmp u okviru kursa “Analogna elektronika”

$A = \left. \frac{v_o}{v_u} \right|_{J_u=0}$ [V/V] $R_u = \infty$
 $R_i = 0$
 $A \rightarrow \infty$

do tada – UPAMTITI osobine značenje

beskonačno pojačanje \Rightarrow $v_u=0 \rightarrow v_o=v_o$

beskonačna ulazna otpornost \Rightarrow $i_u=0$

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 111

Idealni operacioni pojačavač

$A = \left. \frac{v_o}{v_u} \right|_{J_u=0}$ [V/V] $R_u = \infty$
 $R_i = 0$
 $A \rightarrow \infty$

do tada – UPAMTITI osobine značenje

beskonačno pojačanje \Rightarrow $v_u=0 \rightarrow v_o=v_o$

beskonačna ulazna otpornost \Rightarrow $i_u=0$

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

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

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 112

Idealni operacioni pojačavač

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*

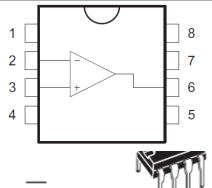
01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 113

Idealni operacioni pojačavač

UPAMTITI i ograničenja REALNIH OpAmp

2. Naponska razdešenost (V_{offset}) $1mV < V_{OS} < 5mV$
3. Struja polarizacije (I_{bias}) $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \leq 100nA$
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 $SR = \frac{dv_i}{dt} < 1V/\mu s$
7. Naponsko zasićenje $\pm |V_{CC} - 2V|$
8. Maksimalna izlazna struja (strujno zasićenje) $\sim x10mA$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 114



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	UA7411	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.

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 115

Realni oper:

Kataloški 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 ($R_L \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5	mV
V_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30	nA
I_{io}	Input Bias Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50	25	200	V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_L \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77	77	90	dB
I_{CC}	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8	nA
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 ($R_L \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70	70	90	dB
I_{OS}	Output short-circuit Current $T_{amb} = +25^\circ C$	10	25	40	nA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $V_i = \pm 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$	12	14	13	V
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, \text{unity Gain}$	0.25	0.5		V/ μs
L	Rise Time $V_i = \pm 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, \text{unity Gain}$		0.3		μs
K_{ov}	Overhoot $V_i = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, \text{unity Gain}$		0.3		%
RI	Input Resistance	0.3	2		M Ω
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, T_{amb} = +25^\circ C$		0.06		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_L = 100\Omega$		23		$\mu V_{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase Margin		50		Degrees

01. novembar 2018. 116

Idealni operacioni pojačavač

Korisni linkovi

<http://www.analog.com/>

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

<http://www.linear.com/>


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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 117

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!

27. oktobar 2016. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 118

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

01. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 119

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).

02. novembar 2017. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 120

Idealni operacioni pojačavač

Sledećeg časa

Modeli poluprovodničkih komponentata

(Osnovni jednostepeni pojačavači sa BJT)

121

Dodatak:

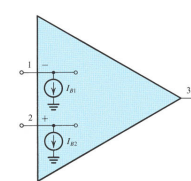
Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Razlika struja polarizacije naziva se struni ofset ili strujna razdešenost.

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

input offset current



Pojačavač bez ofseta

122

Dodatak:

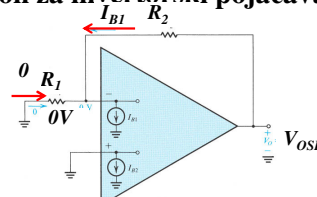
Realni operacioni pojačavač

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} !



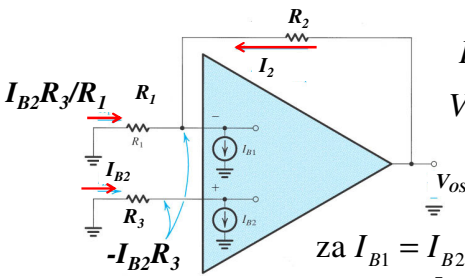
123

Dodatak:

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujni ofset (razdešenost)

Uticaj strujnog ofseta može da se umanja vezivanjem R_3



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

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

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

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

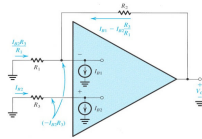
124

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

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 125

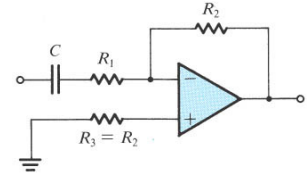
Dodatak:

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 $R_3 = R_2$

01. novembar 2018. Operacioni pojačavači 126