

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (25.11.2017.)	50%	20%
Kolokvijum II (20.01.2018.)	50%	20%
	120%	60%

Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

02. novembar 2017. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> Uvod 1

Sadržaj

- Operacioni pojačavači
 - Idealni operacioni pojačavači
 - Polarizacija
 - Modeli
 - Primena
 - Realni operacioni pojačavači

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 2

Operacioni pojačavači

Zašto "Operacioni"?

02. novembar 2017. 3

Da se podsetimo

Operacioni pojačavač po karakteristikama liči na idealni naponski pojačavač

Naponski

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

Idealni

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 4

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

$V_u = 0$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 5

Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 6

Idealni operacioni pojačavač

Prenosna karakteristika

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 7

Idealni operacioni pojačavač

Idealna prenosna karakteristika

02. novembar 2017. 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!!!

02. novembar 2017. 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!!!

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 10

Idealni operacioni pojačavač

Simbol operacionog pojačavača

1 Invertujući ulaz
 2 Neinvertujući ulaz
 3 Izlaz

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

Jedan izlazni priključak

Šta operacioni pojačavač pojačava kad ima dva ulaza?

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 11

Idealni operacioni pojačavač

Treba da pojačava razliku signala

na neinvertujućem “+” i invertujućem “-” ulazu

$v_u = v_d = v_+ - v_-$

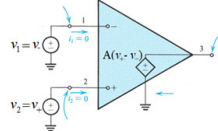
$A = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \rightarrow \infty \Rightarrow v_+ - v_- = 0 \Rightarrow v_+ = v_-$

$v_+ = v_-$

02. novembar 2017. 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:

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

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

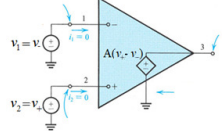
Želimo samo pojačanje razlike signala na izlazu (šumovi)

02. novembar 2017. 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

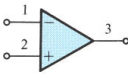
$A = A_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_i}{v_+ - v_-} \Rightarrow \infty \quad v_+ - v_- = 0 \quad v_+ = v_-$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti signala CMRR

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 14

Idealni operacioni pojačavač



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

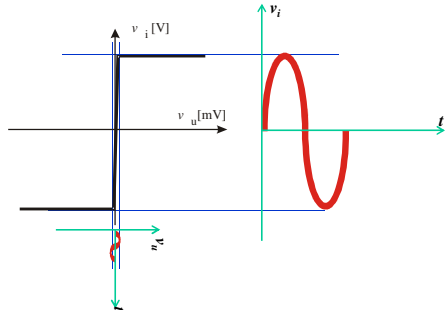
Idealne operacione pojačavače karakterišu

- 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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 15

Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a



02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 16

Idealni operacioni pojačavač

Polarizacija OpAmp-a

(a) (b)

02. novembar 2017. 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)

02. novembar 2017. 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*

02. novembar 2017. 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 **$v_+ = v_-$** .

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 20

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač* –

izlazni signal suprotne faze od ulaznog

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 21

Idealni operacioni po

Invertorski pojačavač

$i_u=i_1+i_2=0A \Rightarrow i_1=-i_2$
 $i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1}$
 $i_2 = \frac{v_i - v_1}{R_2} = \frac{v_i}{R_2}$

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 22

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač

osobine

Naponsko pojačanje

Ulazna otpornost

Izlazna otpornost

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 23

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{u(zp)}$

$R_{u(zp)} = \frac{v_g}{i_g} = ?$
 $i_g=i_1$
 $i_1 = \frac{v_g - v_1}{R_1} = \frac{v_g}{R_1}$

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 24

Idealni operacioni pojačavač

Invertorski pojačavač – $R_{i(zp)}$

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

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

02. novembar 2017.Operacioni pojačavači25

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač –

izlazni signal je u fazi sa ulaznim

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

02. novembar 2017.Operacioni pojačavači26

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

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

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

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

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

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

02. novembar 2017.Operacioni pojačavači27

Idealni operacioni pojačavač

Neinvertorski pojačavač

$R_{u(zp)}$

$R_{i(zp)}$

$i_g = i_u = 0$

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

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

02. novembar 2017.Operacioni pojačavači28

Idealni operacioni pojačavač

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

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

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

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

02. novembar 2017. jačavači (b) 29

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za sabiranje – Weighted Summer

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

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

$$v_i = 0 - iR_f$$

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 30

Idealni operacioni pojačavač

Domaći 4.1

Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 31

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač

Kolo za „oduzimanje“ – pojačavač razlike signala

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

02. novembar 2017. 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 sabereemo

02. novembar 2017. Operacioni pojačav 33

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

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

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

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 34

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

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

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

(b)

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 35

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač –
Diferencijalno pojačanje u zatvorenoj petlji

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 36

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – A_{cm} u zatvorenoj petlji

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

$$v_1 = v_2$$

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

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

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

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

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

02. novembar 2017.
Operacioni pojačavači
37

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač – A_{cm} u zatvorenoj petlji

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

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

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

02. novembar 2017.
Operacioni pojačavači
38

Idealni operacioni pojačavač

Diferencijalni balansni pojačavač - R_u

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

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

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

Virtuelni kratak spoj

Ako se zahteva veliko R_{up} , R_1 mora da bude veliko!

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

02. novembar 2017.
Operacioni pojačavači
39

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?

02. novembar 2017.
Operacioni pojačavači
40

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?

Instrumentacioni pojačavač

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 41

Idealni operacioni pojačavač
Diferencijalni balansni pojačavač

Kako napraviti diferencijalni pojačavač sa većom ulaznom otpornošću?

Instrumentacioni pojačavač

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 42

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

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

Povećano pojačanje i ulazna otpornost.

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

-A₁ i A₂ moraju da budu savršeno upareni 😞

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 43

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

-Da bi se menjalo A_d, treba menjati po dva otpornika R₁ istovremeno

-Kontrola A_d promenom jednog otpornika vrednosti 2R₁

03. novembar 2015. Operacioni pojačavači 44

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač

(b)

45

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači

46

Idealni operacioni pojačavač
Instrumentacioni pojačavač NIJE isto što i operacioni!

IAKO ISTO IZGLEDAJU U RADNJI!

Integrirano kolo

OPERACIONI Instrumentacioni

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači

47

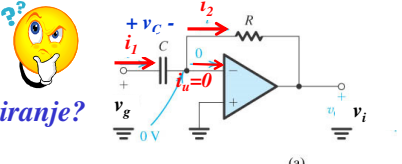
Idealni operacioni pojačavač
Invertujući pojačavač sa impedansama –
A(s) u zatvorenoj petlji (ZP)

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači

48

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje – f karakteristika



diferenciranje?

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

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

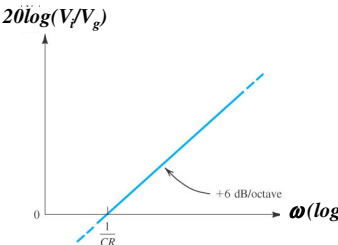
$$i_1 = i_2$$

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

$$A(s) = \frac{v_i}{v_g} = -s \cdot R \cdot C = -\frac{s}{\omega_0}$$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 49

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje – f karakteristika



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

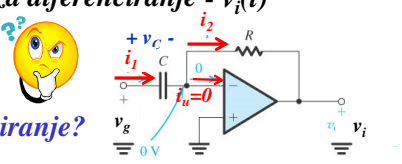
$$|A(s)| = \omega RC$$

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

Ponaša se kao VF filter sa graničnom frekvencijom u beskonačnosti

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 50

Idealni operacioni pojačavač
Kolo za diferenciranje - v_i(t)



diferenciranje?

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

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

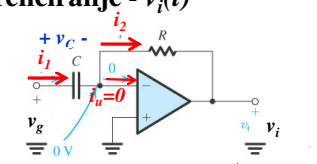
$$i_2(t) = \frac{0 - v_i(t)}{R}$$

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

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

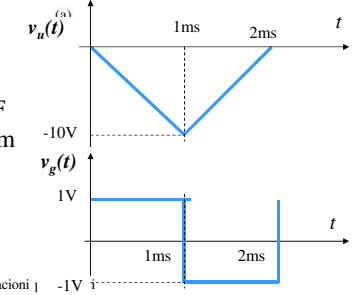
02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 51

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:



02. novembar 2017. Operacioni 52

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje – f karakteristika

integraljenje?

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 53

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 54

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - v_i(t)

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 55

Idealni operacioni pojačavač

Kolo za integraljenje - v_i(t)


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

R=10k
C=10nF

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 56

Zašto "Operacioni"?

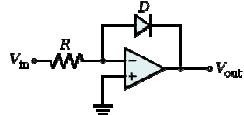
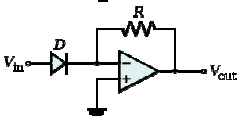


Mogu da se koriste za različite računске OPERACIJE

- Sabiranje,
- Oduzimanje
- Diferenciranje
- Integraljenje

ali i

- Logaritmovanje,
- Antilogaritmovanje
- Množenje
- Deljenje

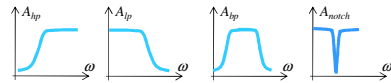
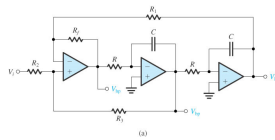
02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 57

Idealni operacioni pojačavač

Pored toga


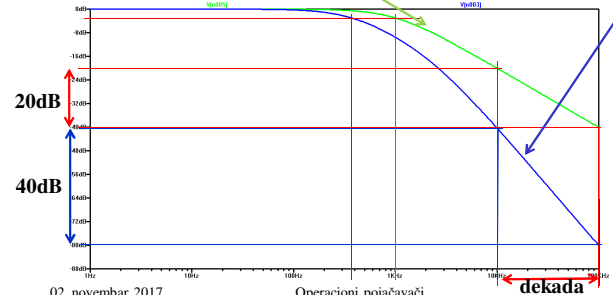
Mogu da se koriste za različite druge korisne primene

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 58

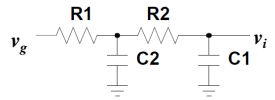
Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 59

Filtri drugog reda (selektivniji -40dB/dec)

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



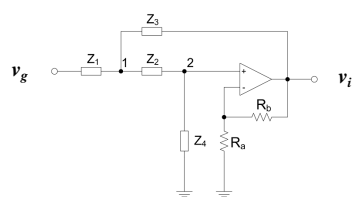
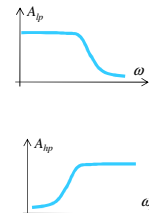
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{s^2(R_1C_1R_2C_2) + s(R_1C_2 + R_2C_1 + R_1C_1) + 1}$$

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 60

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key konfiguracija)

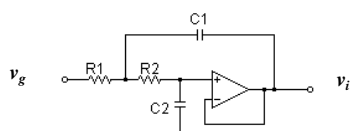
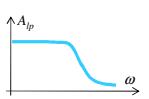
<http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php>

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 61

Idealni operacioni pojačavač

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

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

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

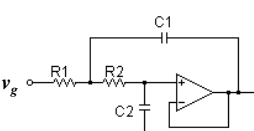
$$\frac{v_i}{v_g} = \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2)s + 1}$$

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

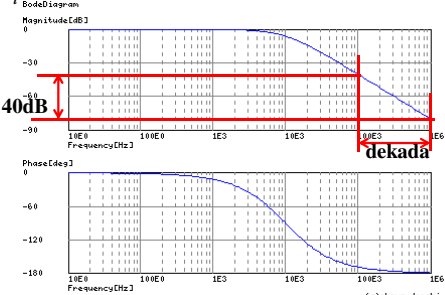
02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 62

Idealni operacioni pojačavač

Aktivni filtri – (Sallen-Key LP konfiguracija) NF



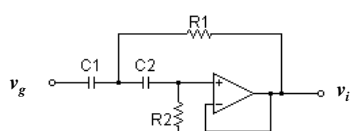
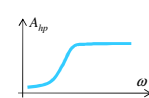
$R_1 = R_2 = 16\text{k}\Omega$
 $C_1 = C_2 = 0.001\mu\text{F}$
 $f_c = 10\text{kHz}$



02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 63

Idealni operacioni pojačavač

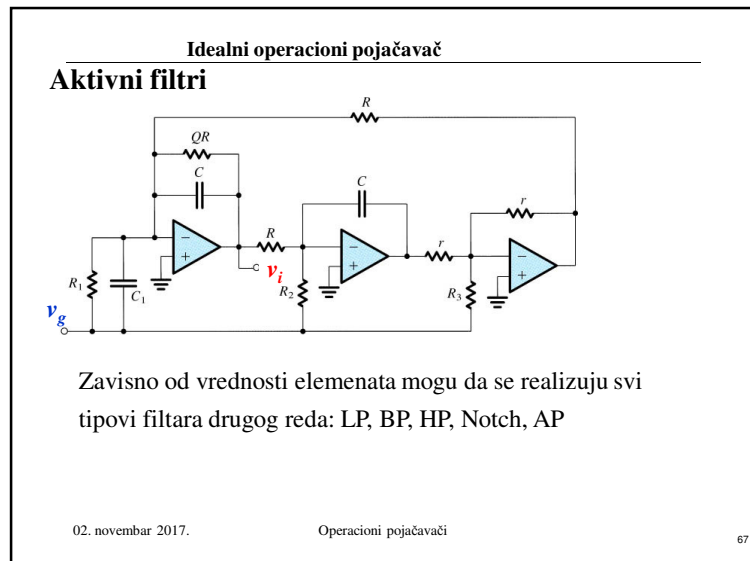
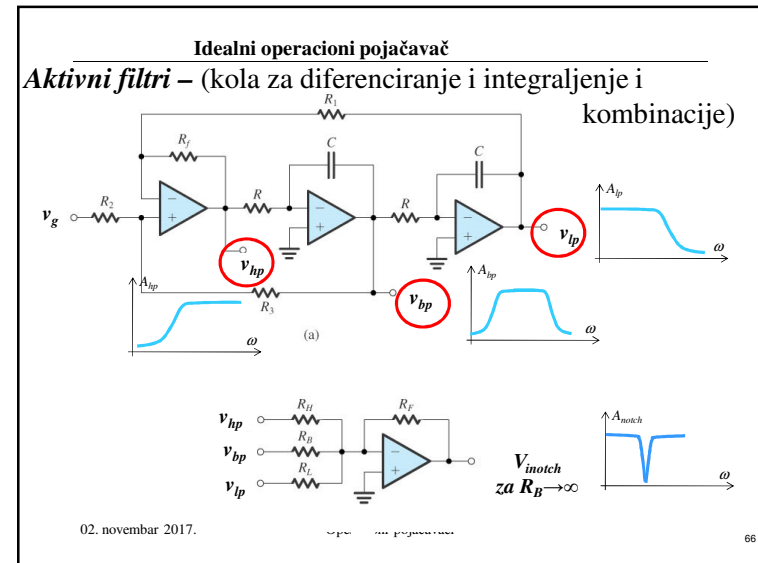
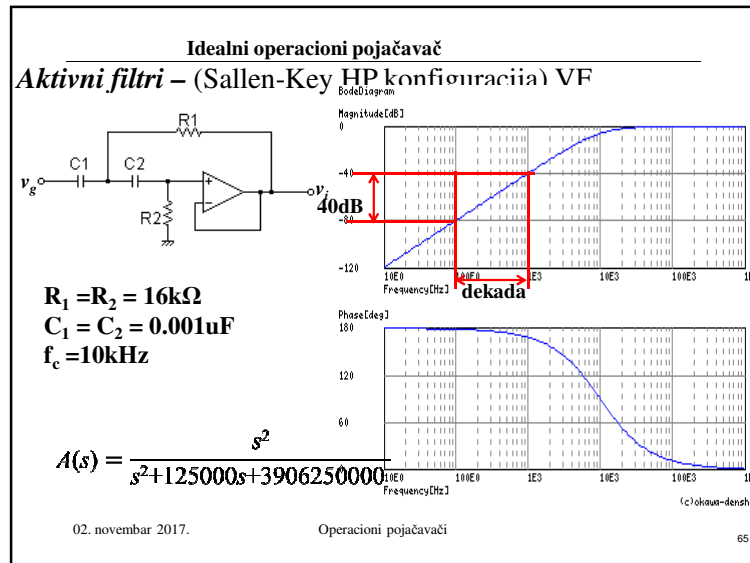
Aktivni filtri – (Sallen-Key HP konfiguracija) VF

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 64



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 $\Rightarrow idealne f k-ke$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 68

Realni operacioni pojačavač

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 $\Rightarrow \text{realne } f k\text{-ke}$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 69

Realni operacioni pojačavač

Efekte konačnog pojačanja
Invertorski pojačavač

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

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

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

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 70

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)

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 71

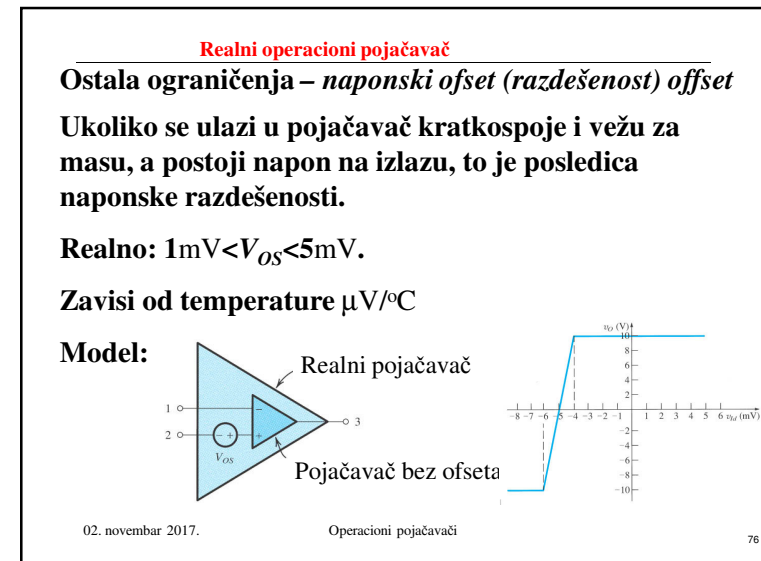
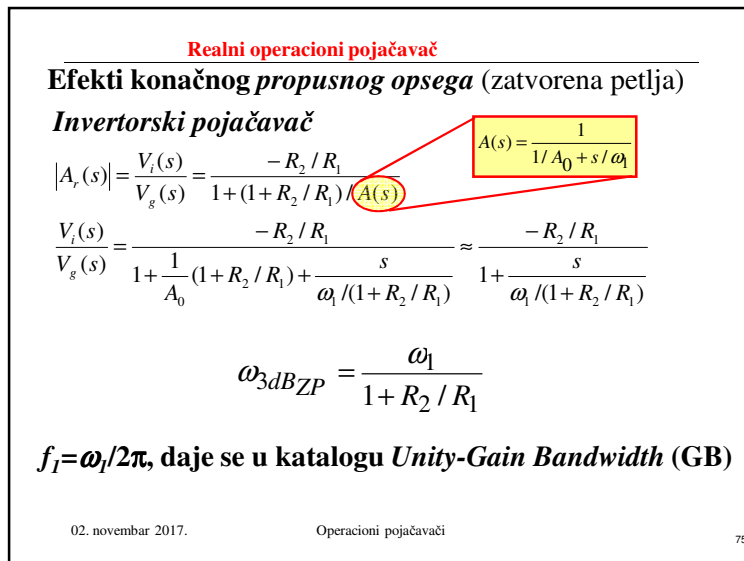
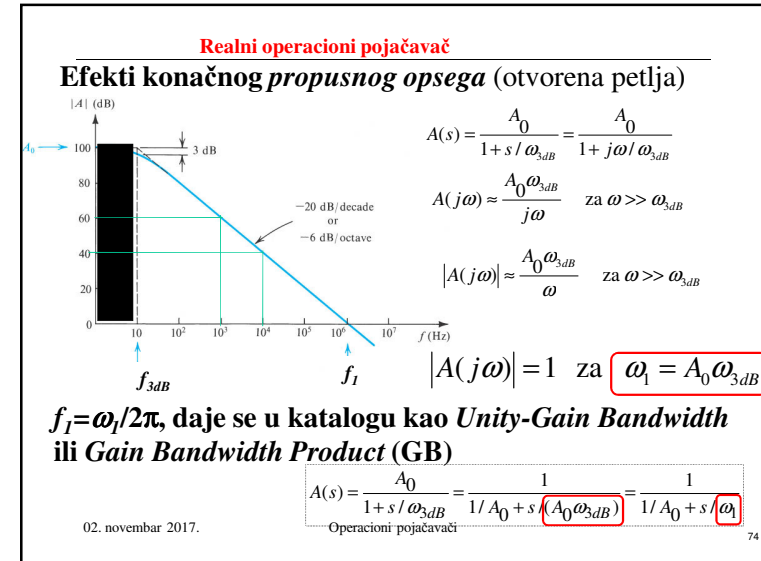
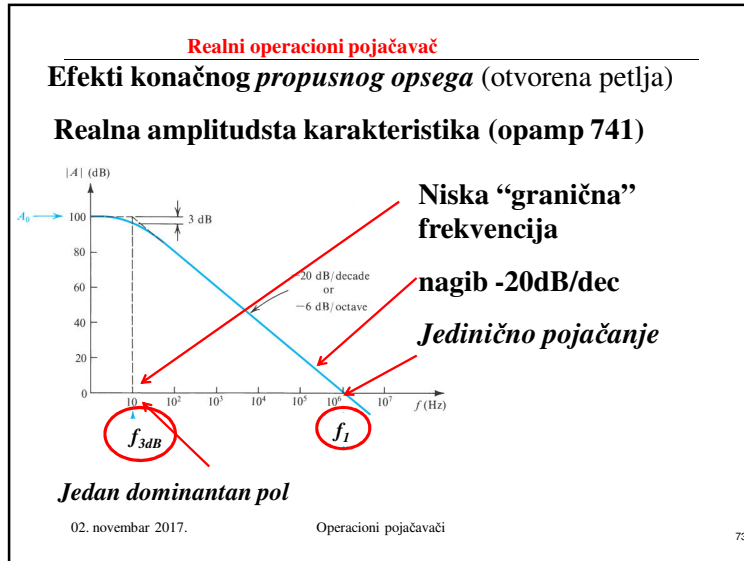
Realni operacioni pojačavač

Efekte 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?

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 72



Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponski ofset (razdešenost) offset

Uticaj naponskog ofseta na invertujući i neinvertujući pojačavač je identičan:

Pojačavač bez ofseta

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

(Manji za veće R_1)

Kompencijacija ofseta

OP177/AD707 OFFSET ADJUSTMENT PINS

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 77

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 78

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 79

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – struja polarizacije i strujni ofset (razdešenost)

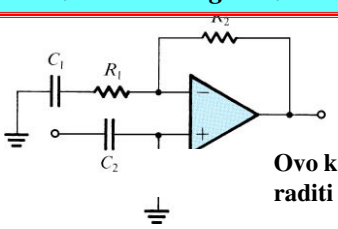
Način kompenzacije strujnog ofseta objašnjen je u **Dodatku 02.11.2017**

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 80

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!!!

02. novembar 2017. 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)*

02. novembar 2017. 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

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

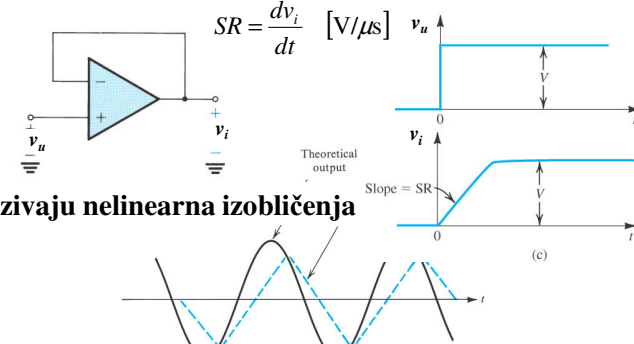
$$PSR = 20 \log \left[\frac{\Delta V_{SS}}{V_d} \right] \quad \text{red veličine 90dB}$$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 83

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 izobličenja

02. novembar 20 84

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – naponsko zasićenje

Uvek je manje od +/- napon napajanja

(b) (a) (b)

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

Rated output voltage $= \pm 13V$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 85

Realni operacioni pojačavač

Ostala ograničenja – strujno zasićenje

Maksimalna izlazna struja je ograničena.

Za 741 iznosi $\pm 20mA$

Voditi računa pri projektovanju!

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 86

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	➔	$V_u=0 \rightarrow V_+ = V_-$
beskonačna ulazna otpornost	➔	$I_{ul}=0$
izlazna otpornost jednaka nuli	➔	$V_{iz} \neq f(R_p)$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 87

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	➔	$V_u=0 \rightarrow V_+ = V_-$
beskonačna ulazna otpornost	➔	$I_{ul}=0$
izlazna otpornost jednaka nuli	➔	$V_{iz} \neq f(R_p)$
ne pojačava srednju vrednost	➔	$A_{cm}=0$ <i>Ne pojačava DC</i>
beskonačni propusni opseg	➔	<i>idealne f k-ke</i> <i>(prošla nedelja)</i>

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 88

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*

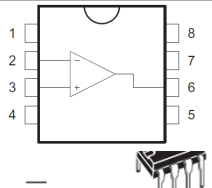
02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 89

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) $\sim x10mA$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 90



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.

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 91

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	6	mV
I_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	2	30	70	nA
I_{ib}	Input Bias Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10	100	200	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_L \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	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	3.3	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 ($R_L \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70	90		dB
I_{OS}	Output short-circuit Current $T_{amb} = +25^\circ C$	10	25	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$	12	14	14	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

02. novembar 2017. 92

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 93

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: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

27. oktobar 2016. Uvod 94
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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

02. novembar 2017. Uvod 95
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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).

02. novembar 2017. Uvod 96
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

Idealni operacioni pojačavač

Sledećeg časa

Modeli poluprovodničkih komponenata

(Osnovni jednostepeni pojačavači sa BJT)

97

Dodatak:

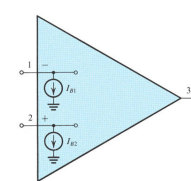
Realni operacioni pojačavač

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

98

Dodatak:

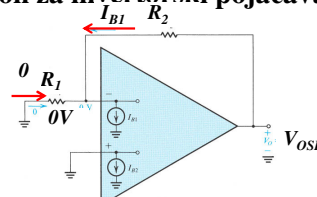
Realni operacioni pojačavač

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} !



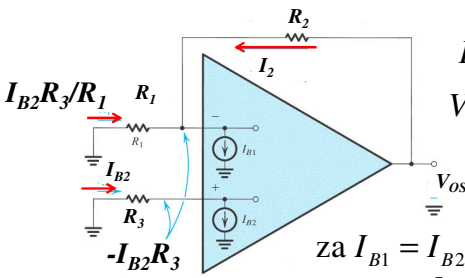
99

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

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

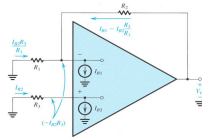
100

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

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 101

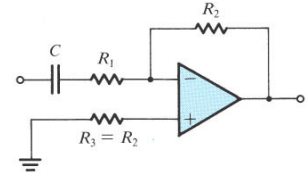
Dodatak:

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 $R_3 = R_2$

02. novembar 2017. Operacioni pojačavači 102