

## Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

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

**Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA**

**Savet: Učite, konstantno po malo, MNOGO JE LAKŠE da POLOŽITE preko KOLOKVIJUMA!**

07. decembar 2017. 1

Da se podsetimo

**Da li i kako mogu da se poboljšaju osobine?**

**Koje osobine?**

- izobličenja,
- stabilnost (ne)osetljivost
- $R_{ul}$ ,  $R_{iz}$  otpornost
- propusni opseg

07. decembar 2017. Višestepeni pojačavači 3

## Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

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

**Ko nije izašao na I kolokvijum, a ide na lab i predavanja od 120, ima 70% (još nije kasno); ako ne ide na predavanja ima 60% (nije kasno); ali, ako na drugom kolokvijumu ima < 80% imaće < 50% (e, tada je kasno)**

07. decembar 2017. 2

Pojačavači sa povratnom spregom

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 4

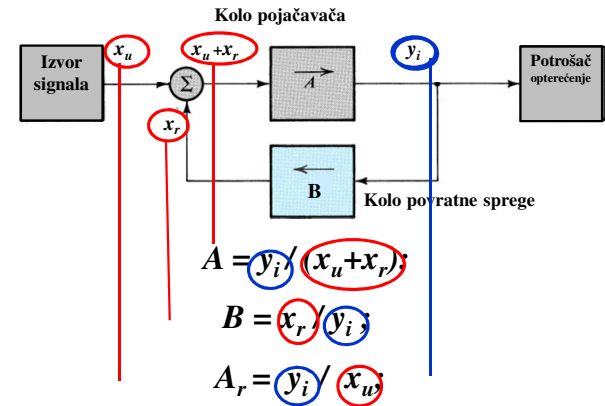
1. Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom
  1. Tipovi sprege
2. Osobine negativne povratne sprege
  1. Uticaj na pojačanje pojačavača
  2. Uticaj na osetljivost pojačavača
  3. Uticaj na nelinearna izobličenja
  4. Uticaj na propusni opseg pojačavača
  5. Uticaj na šumove
3. Načini realizacije pojačavača sa NPS
  1. Paralelno naponska
  2. Redno strujna
  3. Paralelno strujna
  4. Redno naponska
4. Projektovanje pojačavača sa NPS
5. Stablnost pojačavača sa povratnom spregom

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

5

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

7

Da se podsetimo

U opštem slučaju pojačavač signala (nezavisno od tipa) označićemo blokom u kome je upisano slovo A (*Amplifier*)



$x$  predstavlja ulazni signal  
(napon ili struju na ulazu pojačavača)

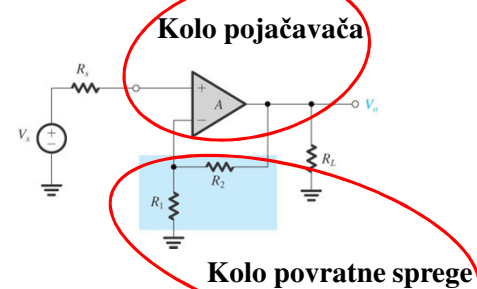
$y$  predstavlja izlazni signal  
(napon ili struju na izlazu pojačavača)

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

6

Primer realne realizacije



07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

8

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$A = y_i / (x_u + x_r);$      $B = x_r / y_i;$      $A_r = y_i / x_u;$

$$A_r = \frac{y_i}{x_u} = \frac{y_i}{x_u + x_r - x_r} = \frac{\frac{y_i}{x_u + x_r}}{1 - \frac{x_r}{x_u + x_r}} = \frac{\frac{y_i}{x_u + x_r}}{1 - \frac{x_r}{x_u + x_r} \frac{y_i}{y_i}} = \frac{\frac{y_i}{x_u + x_r}}{1 - \frac{x_r}{x_u + x_r} \frac{y_i}{y_i}}$$

07. decembar 2017.    Pojačavači sa povratnom spregom    9

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

**Veza između:**

- pojačanja pojačavača sa povratnom spregom  $A_r$
- pojačanja pojačavača bez povratne sprege  $A$
- osobine kola povratne sprege  $B$

07. decembar 2017.    Pojačavači sa povratnom spregom    11

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$A = y_i / (x_u + x_r);$      $B = x_r / y_i;$      $A_r = y_i / x_u;$

$$A_r = \frac{y_i}{x_u} = \frac{\frac{y_i}{x_u + x_r}}{1 - \frac{x_r}{x_u + x_r} \frac{y_i}{y_i}} = \frac{A}{1 - BA}$$

07. decembar 2017.    Pojačavači sa povratnom spregom    10

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$$A_r = \frac{A}{1 - AB}$$

**Funkcija povratne sprege**     $f(\omega) = 1 - A(\omega)B(\omega)$

**Kružno pojačanje**     $\Phi(\omega) = A(\omega)B(\omega)$

**Zavisi od frekvencije**

07. decembar 2017.    Pojačavači sa povratnom spregom    12

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

za  $AB \gg 1 \Rightarrow A_r = -\frac{1}{B}$

**Ako je  $AB \gg 1$ , pojačanje pojačavača sa PS zavisi samo od kola povratne sprege**

**Ovo treba imati na umu kada se razmatraju kola sa operacionim pojačavačima**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 13

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

$|1-AB| < 1 \Rightarrow A_r > A$  **POZITIVNA**

$|1-AB| > 1 \Rightarrow A_r < A$  **NEGATIVNA**

$|1-AB| = 1 \Rightarrow B = 0, A_r = A$  **BEZ REAKCIJE**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 15

**Primer:**

**Odrediti B i  $A_r$  ako je pojačavač idealizovan sa  $A=10^4$ ,  $R_1=1k$ ,  $R_2=9k$ . (Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)**

$$B = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} = -\frac{1k}{1k + 9k} = -0.1$$

$$A_r = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1-AB} = \frac{10000}{1+10000 \cdot 0.1} = \frac{10000}{1001} \approx 10$$

**Uporediti sa pojačanjem neinvertorskog pojačavača!!!:**

$$A = \frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 14

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

$|1-AB| < 1 \Rightarrow A_r > A$  **POZITIVNA**

**Signal,  $x_r$ , vraća se u fazi sa signalom  $x_u$ !**

**Signal na ulazu pojačavača RASTE, tako da i vrednost izlaznog signala RASTE.**

**Iako pojačanje raste ovo NIJE DOBRO jer pojačavač postaje nestabilan.**

**izlazni signal stalno raste**

07. decembar 2017. 15

$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

$|1-AB| < 1 \rightarrow A_r > A$  **POZITIVNA**


Da bi povratna sprega bila pozitivna, vraćeni i ulazni signal moraju biti u fazi: ako pojačavač obrće fazu, i kolo povratne sprega treba da obrće fazu (i obrnuto)





Pozitivna povratna sprega koristi se za realizaciju oscilatora (biće reči kasnije u okviru ovog kursa)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 17

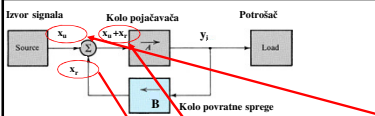
$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

$1-AB > 1 \rightarrow A_r < A$  **NEGATIVNA**

 Smanjuje pojačanje pojačavača bez reakcije, ali popravlja mnoge druge karakteristike pojačavača:

1. Smanjuje osetljivost pojačavača 
2. Smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja 
3. Povećava propusni opseg pojačavača i čini ga ravnijim (smanjuje linearna izobličenja) 
4. Smanjuje šumove generisane unutar pojačavača 

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 19



$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

$1-AB > 1 \rightarrow A_r < A$  **NEGATIVNA**

Signal,  $x_r$ , vraća se u protiv fazi sa signalom  $x_u$ !

Signal na ulazu pojačavača se smanjuje, tako da se i vrednost izlaznog signala smanjuje.

Da bi se ostvarila negativna povratna sprega: Ako kolo povratne sprega ne obrće fazu (otporno kolo)  $B > 0$ , tada je neophodno da  $A < 0$ , odnosno da pojačavač obrće fazu.

(Zajednički emitor/sors)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 18

**Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 20

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Parametri kola menjaju vrednost usled promena temperature, starenja, i sl.

Pod parametrima kola podrazumevaju se vrednosti

- pasivnih komponenata  
otpornika, kondenzatora,...
- parametri aktivnog elementa (tranzistora):  
~ koeficijent pojačanja,  
~ strmina,  
~ unutrašnja otpornost,...

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

21

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Koliko iznosi osetljivost pojačanja osnovnih pojačavača (bez PS) na pojedine parametre kola?

Pojačanje pojačavača sa zajedničkim sorsom (MOSFET) iznosi

$$A = -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \equiv \left\{ -\frac{\mu R_D}{R_i + R_D} = -\frac{S R_i R_D}{R_i + R_D} \right\}$$

Ukoliko je  $g_m=100\text{mA/V}$ ,  $r_o=50\text{k}$  i  $R_D=5\text{k}$ , dobija se  $A=-454,5$

Ako se ugradi komponente koje imaju toleranciju

10% sa vrednostima:  $g_m=90\text{mA/V}$ ,  $r_o=45\text{k}$  i  $R_D=4\text{k}$

Dobiće se  $A = -368,2$  odnosno za manje za  $\Delta A/A = 19\%$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

23

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Pored toga, sve komponente ugrađene u pojačavač, prave se sa određenom tolerancijom. To znači da iz proizvodnje ne mogu da izađu dva pojačavača sa identičnim vrednostima elemenata kola, čak i kada su rađeni u istoj seriji.

Značajno je, sa aspekta proizvodnje, da osobine uređaja (pojačavača) istog tipa budu što sličnije – ako ne mogu biti iste.

Zato je veoma važno da osetljivost karakteristika pojačavača – pojačanja – na promene vrednosti pojedinih parametara kola budu male.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

22

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

$$A \approx -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} R_C = -g_m R_C \quad \text{BJT}$$

$$A = -\frac{S R_i R_D}{R_i + R_D} = -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \approx -g_m R_D \quad \text{MOS}$$

Promene vrednosti parametara tranzistora ( $\mu$ ,  $g_m$ ,  $r_o$ ) i elemenata kola ( $R_C$ ;  $R_D$ ) utiču na promenu pojačanja bez povratne sprege.

Da li taj uticao može da se smanji kod pojačavača sa povratnom spregom?

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

24

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Mera zavisnosti odziva na promenu vrednosti parametara definiše se kroz *Koeficijent osetljivosti*

Koeficijent osetljivosti odziva  $y$  na promenu vrednosti parametra  $p$  u kolu definiše se kao:

$$s_p^y = \frac{\partial y}{\partial p}$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

25

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Još bolji uvid daje *relativna osetljivost*:

$$\frac{\partial A_r}{A_r} = \frac{1}{1-AB} \frac{\partial A}{A}$$

relativna osetljivost pojačanja sa PS  $\left(\frac{\partial A_r}{A_r}\right)$

$(1-AB)$  puta je manja

od relativne osetljivosti pojačanja bez PS  $\left(\frac{\partial A}{A}\right)$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

27

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Koeficijent osetljivosti pojačanja sa povratnom spregom  $A_r$ , na promenu vrednosti pojačanja pojačavača bez povratne sprege  $A$ , definiše se kao:

$$s_A^{A_r} = \frac{\partial A_r}{\partial A} = \frac{\partial \left( \frac{A}{1-AB} \right)}{\partial A} = \frac{1}{(1-AB)^2}$$

Očigledno je da će osetljivost pojačavača sa povratnom spregom na promenu pojačanja pojačavača bez povratne sprege biti manja ako je funkcija povratne sprege veća.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

26

Uticao negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

**Primer:**

Ako je  $(1-AB)=10$ ,  $\Delta A/A=20\%$

tada je  $\Delta A_r/A_r = (\Delta A/A)/(1-AB) = 2\%$ , odnosno

za  $A=1000$  i promenu  **$800 < A < 1200$**

pojačanje sa PS,  $A_r$ , menja se sa  $A_r=100$  u opsegu

**$98 < A_r < 102$**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

28

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Osim osetljivosti na promenu pojačanja bez PS, treba razmotriti i osetljivost pojačanja sa PS na promenu vrednosti B

$$s_B^{A_r} = \frac{\partial A_r}{\partial B} = \frac{A^2}{(1-AB)^2}$$

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

U prethodnom primeru ako se B promeni za 10% dobija se:

$$\frac{\partial A_r}{A_r} = \frac{AB}{1-AB} \frac{\partial B}{B} = -\frac{9}{10} \cdot \frac{10}{100} = -\frac{9}{100}$$

Osetljivost pojačanja sa PS približno je jednaka osetljivosti kola povratne sprege.

Zato se za realizaciju kola PS koriste komponente sa manjim tolerancijama.

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

relativni koeficijent osetljivosti je

$$\frac{\partial A_r}{A_r} = \frac{s_B^{A_r}}{A_r} \frac{\partial B}{B} B = \frac{A^2}{(1-AB)^2} \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{B} B$$

odnosno

$$\frac{\partial A_r}{A_r} = \frac{AB}{1-AB} \frac{\partial B}{B}$$

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača



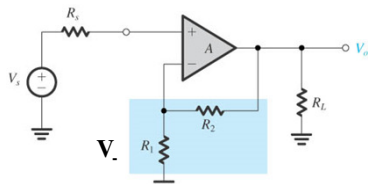
Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)



Odziv pojačavača sa negativnom povratnom spregom osetljiv je na promenu parametara u kolu povratne sprege



**Domaći 9.1:**



U kolu sa slike upotrebljen je idealizovani pojačavač sa  $A=100\text{dB}$ .

Odrediti:

- $R_2/R_1$  tako da se dobije  $A_r=100!$
- $B$  u dB?
- Napon na izlazu  $V_o$ , i  $V_i$  ukoliko je  $V_s=0.1\text{V}$ .
- za koliko će se smanjiti  $A_r$  ukoliko pojačanje  $A$  opadne za 20%?

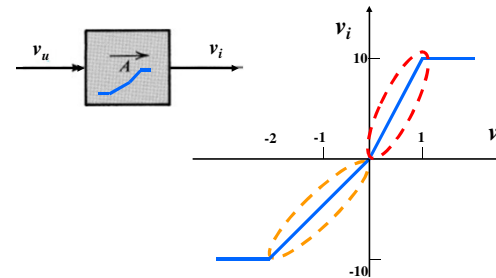
(Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

33

**Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja**



Nelinearna prenosna karakteristika sa slike prikazuje pojačanje u otvorenoj petlji (bez PS) od  $A=10$  za  $0 < v_u < 1$  i  $A=5$  za  $-2 < v_u < 0$ .

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

35

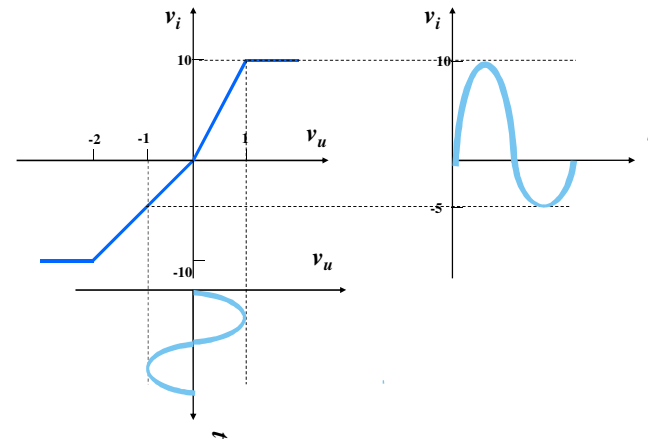
**Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna amplitudska izobličenja**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

34

**Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja**

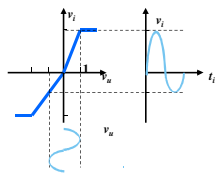


07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

36

**Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja**



Uvođenjem NPS izobličenja mogu da se smanje.

Ako želimo pojačanje  $A_r=10$ , izaberemo  $B=-0.1$

(jer je za  $AB \gg 1$   $A_r = -1/B$ )

S obzirom da je u ovom slučaju  $5 < A < 10$ , da bi  $AB \gg 1$ , treba nam kaskadna veza sa linearnim pojačavačem (bez izobličenja) koji ima veliko  $A$ . Zato ispred ovog pojačavača sa velikim nelinearnim izobličenjima (pojačavač velikih signala) upotrebimo linearni pojačavač sa  $A=1000$ :

**Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja**

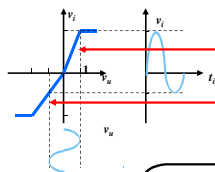
Sada je za  $0 < v_i < 10$ ,  $A_r = 9.99$  i  $A_r = \frac{A}{1-AB}$   
 za  $-10 < v_i < 0$ ,  $A_r = 9.98$   $A_r = \frac{A}{1-AB}$

**Pojačanje je približno isto za obe poluperiode!!**

Smanjuju se nelinearna amplitudska izobličenja!!!

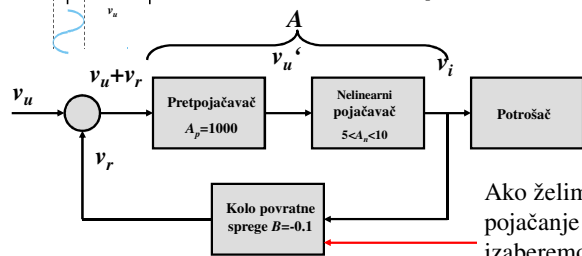
Važi za *aktivni radni režim* izlaznog pojačavača – (u opsegu u kome izlazni pojačavač nije u zasićenju).

**Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja**



Za  $0 < v_i < 10$ ,  $A = A_p A_n = 10,000$

Za  $-10 < v_i < 0$ ,  $A = A_p A_n = 5,000$



Ako želimo pojačanje  $A_r=10$ , izaberemo  $B=-0.1$

Za one koji žele da nauče više

**Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja**

Objašnjenje:

Zamenom  $v_r$  sa  $v_r = Bv_i = B \frac{A}{(1-AB)} v_u = \frac{AB}{(1-AB)} v_u$

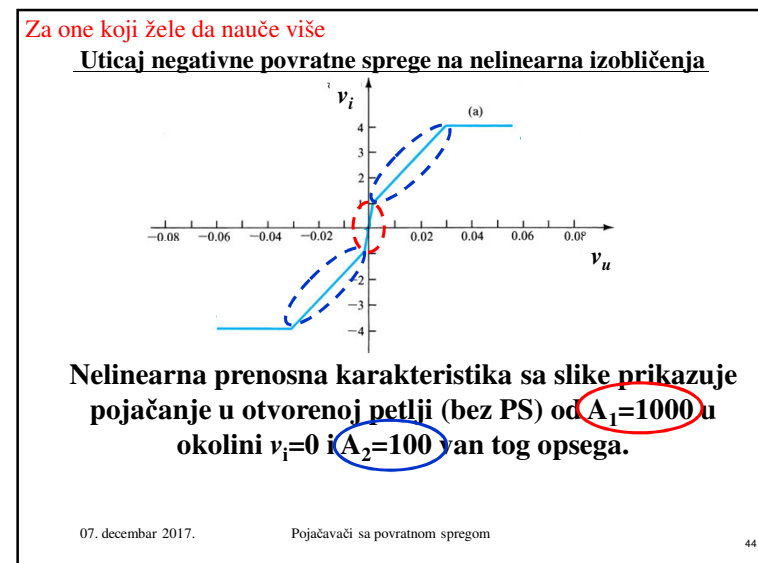
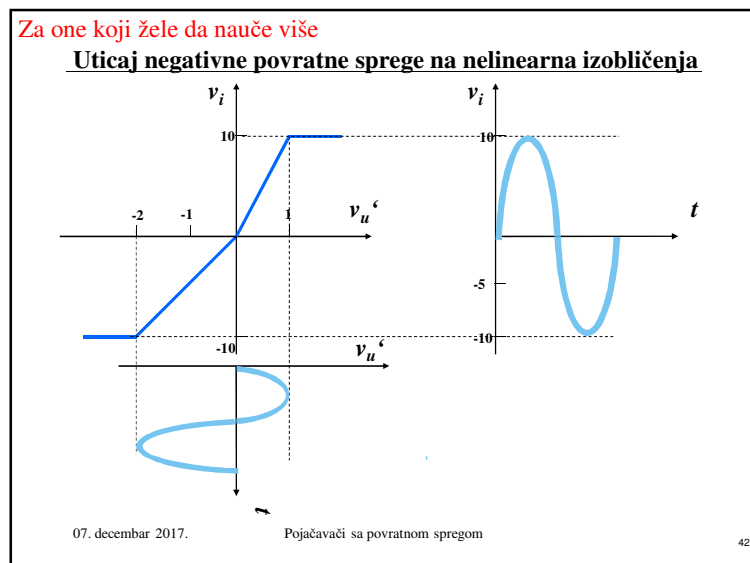
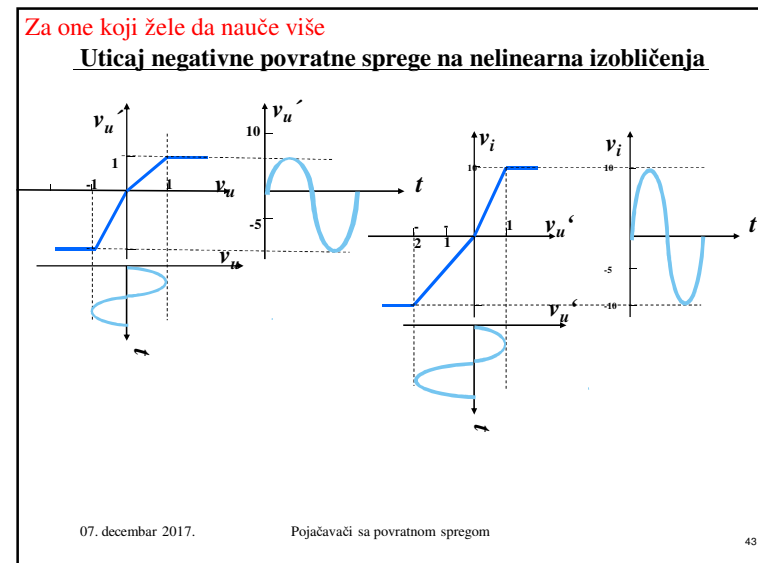
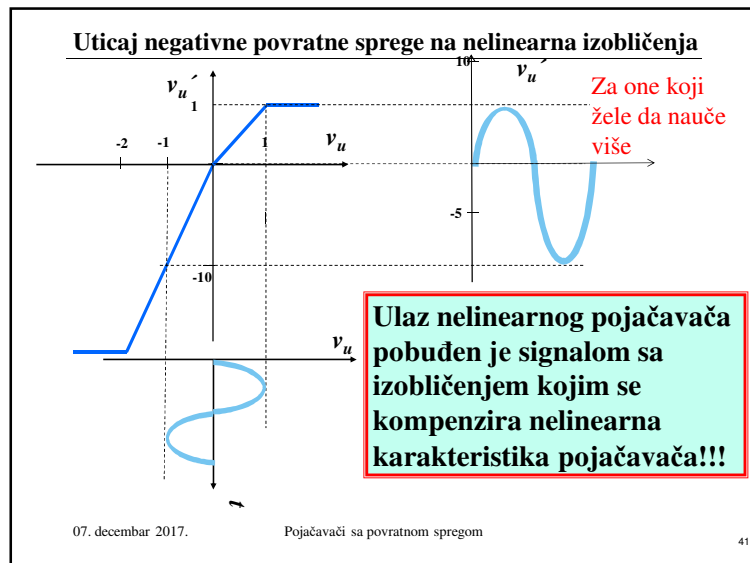
dobija se

$$v_u' = A_1(v_u + v_r) = A_1(v_u + \frac{AB}{1-AB} v_u) = \frac{A_1}{(1-AB)} v_u$$

za  $0 < v_u < 1$ ,  $v_u' = (1000/1001) \cdot v_u = 0.999 \cdot v_u$

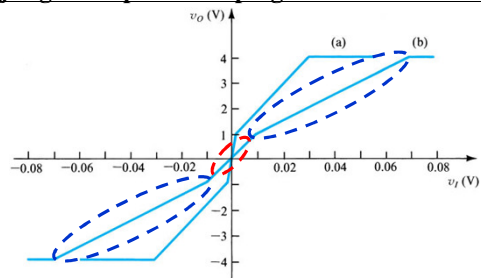
i

za  $-2 < v_u < 0$ ,  $v_u' = (1000/501) \cdot v_u = 1.996 \cdot v_u$



Za one koji žele da nauče više

Uticađ negativne povratne sprega na nelinearna izoblićenja



Kada se primeni povratna sprega od  $B=0,01$  dobija se za pojačavač sa PS prenosna karakteristika kod koje je

$A_{r1}=90,9$  i  $A_{r2}=50$  prikazana na slici (b).

Očigledno je smanjena nelinearnost karakteristike.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

45

Uticađ negativne povratne sprega na nelinearna izoblićenja

Analizom uticaja PS na harmonijske komponente zaključuje se da se sve harmonijske komponente smanjuju za vrednost funkcije povratne sprega.

Jedini način da se smanje nelinearna amplitudska izoblićenja jeste uvođenje negativne povratne sprega.

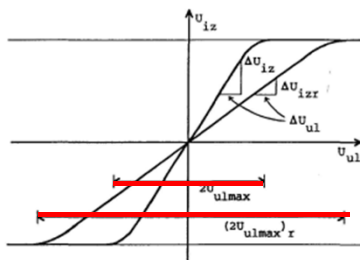
Najčešće se ona primenjuje u poslednjem pojačavačkom stepenu.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

47

Uticađ negativne povratne sprega na nelinearna izoblićenja



Sl. 6.1.2 Ilustracija uticaja negativne povratne sprega na nelinearna izoblićenja.

Pored toga, povećan je dinamički opseg ulaznog signala što znači da se na ulaz pojačavača može dovesti signal veće amplitude, a da izlazni signal neće ući u zasićenje .

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

46

Uticađ negativne povratne sprega na nelinearna izoblićenja



Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izoblićenja

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

48

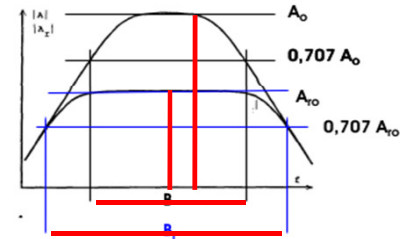
Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

49

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



Efekat NPS ispoljava se kao da se “unutar” amplitudske karakteristike pojačavača bez PS ucrtta karakteristika sa manjim pojačanjem.

**Uočava se da će se propusni opseg povećati!.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

51

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Promena amplitudske i fazne karakteristike direktno se odlikava na odziv signala, odnosno na linearna i fazna izobličenja.

Ranije je rečeno da se usled negativne povratne sprege smanjuje amplituda signala.

Zanimljivo je da se utvrdi šta će se desiti sa propusnim opsegom signala.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

50

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg?

Na niskim,

$$A_n = \frac{A_o}{1 - j \frac{f_n}{f}}$$

$$A_{nr} = \frac{A_n}{1 - A_n B}$$

srednjim

$$A_o$$

$$A_{or} = \frac{A_o}{1 - A_o B}$$

visokim  $f$

$$A_v = \frac{A_o}{1 + j \frac{f}{f_v}}$$

$$A_{vr} = \frac{A_v}{1 - A_v B}$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

52

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg pri niskim  $f$ ?

$$A_{nr} = \frac{A_n}{1 - A_n B} = \frac{A_o}{1 - A_o B} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_n}{(1 - A_o B) \cdot f}} = \frac{A_r}{1 - j \frac{f_{nr}}{f}}$$

$$A_r = \frac{A_o}{1 - A_o B} \quad f_{nr} = \frac{f_n}{1 - A_o B}$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

53

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

Propusni opseg pojačavača sa  $f_v \gg f_n$

$$BW = f_v - f_n \approx f_v,$$

odnosno za pojačavač sa PS

$$BW_r = f_{vr} - f_{nr} \approx f_{vr} = f_v (1 - AB).$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

55

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg pri visokim  $f$ ?

$$A_{vr} = \frac{A_v}{1 - A_v B} = \frac{A_o}{1 - A_o B} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{(1 - A_o B) \cdot f_v}} = \frac{A_r}{1 + j \frac{f}{f_{vr}}}$$

$$A_r = \frac{A_o}{1 - A_o B} \quad f_{vr} = f_v \cdot (1 - A_o B)$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

54

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

$$A_r(f_{vr} - f_{nr}) \approx A_r f_{vr} = \frac{A_o}{1 - A_o B} \cdot (1 - A_o B) \cdot f_v$$

$$A_r(f_{vr} - f_{nr}) \approx A_r f_{vr} = A_o \cdot f_v \approx A_o \cdot (f_v - f_n)$$

Proizvod pojačanja i propusnog opsega ne zavisi od povratne sprege!

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

56

**Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku**

---

**Za pojačavač bez PS za koji važi (6dB/oct)**

$$A = \frac{A_o}{\left(1 - j \frac{f_n}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_v}\right)}$$

**Fazna karakteristika definisana je sa**

$$\Phi = \arg\{A\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v}\right)$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 57

**Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku**

---

**Fazna karakteristika pojačavača bez i sa PS**

$$\Phi = \arg\{A_o\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right)$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 59

**Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku**

---

**Za pojačavač sa PS važi:**

$$A_{nr} = \frac{A_{or}}{\left(1 - j \frac{f_{nr}}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{vr}}\right)}$$

**Tako da je fazna karakteristika definisana sa**

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_{nr}}{f}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_{vr}}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{f} \frac{f_n}{(1 - A_o B)}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v \cdot (1 - A_o B)}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right)$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 58

**Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku**

---

**Kod kola sa PS**

**ispoljava se efekat nelinearnih faznih izobličenja.**

$$\Phi = \arg\{A_o\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_n}{f} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_v} \frac{1}{(1 - A_o B)}\right)$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 60

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne sprega na frekencijsku karakteristiku

Ukoliko se, zbog nelinearnosti prenosne karakteristike, pojačanje menja u zavisnosti od veličine ulaznog signala  $x$  kao:

$$A_\epsilon = A_o [1 + \epsilon(x)] \quad \text{gde je } \epsilon(x) < 1$$

Tada, pri visokim frekvencijama, faza zavisi od veličine signala ukoliko postoji kolo povratne sprega:

$$\Phi_{vr\epsilon} = \text{arctg} \left( \frac{f/f_v}{1 - BA_o [1 + \epsilon(x)]} \right)$$

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

61

Uticao negativne povratne sprega na frekencijske karakteristike



- širi propusni opseg pojačavača.
- amplitudska karakteristika je ravnija, pa su i linearna izobličenja manja.



- proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan (kod pojačavača sa  $f_v \gg f_n$ )



- smanjuje pojačanje.
- povećava nelinearna fazna izobličenja.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

63

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne sprega na frekencijsku karakteristiku

$$\Phi_{vr\epsilon} = \text{arctg} \left( \frac{f/f_v}{1 - BA_o [1 + \epsilon(x)]} \right)$$

Kada nema povratne sprega,  $B=0$ , veličina ulaznog signala,  $x$ , ne utiče na vrednost faze

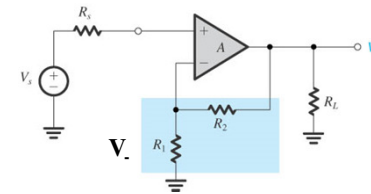
$$\Phi_{vr\epsilon} |_{B=0} = \text{arctg} (f/f_v)$$

07. decembar 2017.

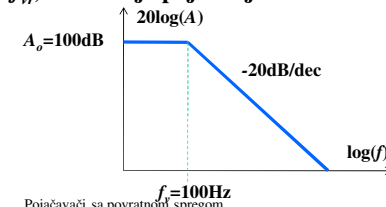
Pojačavači sa povratnom spregom

62

Domaći 9.2:



U kolu iz primera 9.1 odrediti pojačanje pojačavača sa povratnom spregom pri niskim frekvencijama ( $A_{or}$ ) i gornju graničnu frekvenciju ( $f_{vr}$ ) ukoliko je pojačanje  $A$  definisano sa



07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

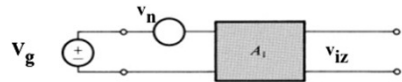
64



### Uticaj negativne povratne sprega na šumove

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 65

### Uticaj negativne povratne sprega na šumove



$$v_{iz} = A_1(v_g + v_n)$$

**Odnos signal-šum na izlazu:**

$$S/\check{S} = (A_1 v_g) / (A_1 v_n) = v_g / v_n$$

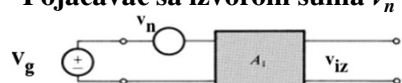
**I signal i šum pojačaće se  $A_1$  puta, tako da odnos signal šum ostaje konstantan**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 67

### Uticaj negativne povratne sprega na šumove

**Pod izvesnim uslovima** negativna PS može da smanji uticaj šumova, odnosno da poveća odnos signal-šum

Pojačavač sa izvorom šuma  $v_n$

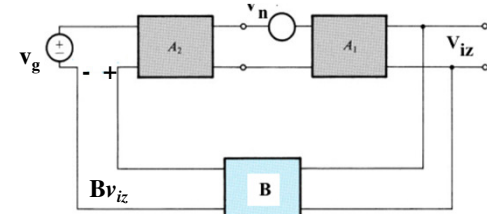


**Odnos signal-šum na ulazu:**

$$S/\check{S} = v_g / v_n$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 66

### Uticaj negativne povratne sprega na šumove



$$((v_g - Bv_{iz})A_2 + v_n) \cdot A_1 = v_{iz}$$

$$A_1 \cdot A_2 \cdot v_g - B \cdot A_1 \cdot A_2 v_{iz} + A_1 \cdot v_n = v_{iz}$$

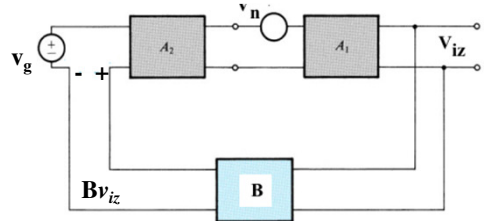
$$A_1 \cdot A_2 \cdot v_g + A_1 \cdot v_n = v_{iz} + B \cdot A_1 \cdot A_2 v_{iz} = (1 + B \cdot A_1 \cdot A_2)v_{iz}$$

$$v_{iz} = \frac{A_1 \cdot A_2}{(1 + B \cdot A_1 \cdot A_2)} \cdot v_g + \frac{A_1}{(1 + B \cdot A_1 \cdot A_2)} \cdot v_n$$

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 68

**Uticaj negativne povratne sprege na šumove**

---



$$v_{iz} = \frac{A_1 A_2}{(1 - A_1 A_2 B)} v_g + \frac{A_1}{(1 - A_1 A_2 B)} v_n \Rightarrow S/\bar{S} = \frac{v_g}{v_n} A_2$$

**odnos signal šum povećan je  $A_2$  puta!** 😊

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 69

**Uticaj negativne povratne sprege na šumove**

---

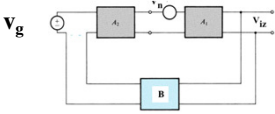
😊

**Negativna povratna sprega utiče na smanjenje šuma generisanih unutar samog pojačavača.**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 71

**Uticaj negativne povratne sprege na šumove**

---



**Ovo se koristi kod audio pojačavača snage za potiskivanje šuma napajanja.**

**Šum napajanja generiše se usled velikih struja u samom pojačavaču snage, koji ima naponsko pojačanje  $A_1=1$ !**

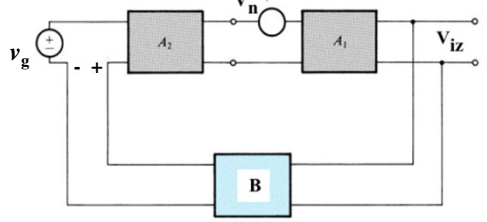
**Veliko naponsko pojačanje ostvari se u pretpojačavaču sa velikim  $A_2$ , a primenom PS generisani šum na izlazu potisne se  $A_2$  puta.**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 70

**Domaći 9.3:** 🤔

**Izlazni stepen pojačavača sa naponskim pojačanjem  $A_1=1V/V$  pobuđuje se signalom  $v_g=1V$ , a u njemu se generiše se šum intenziteta  $v_n=1V$ .**

**Odrediti za koliko će se poboljšati odnos signal-šum na izlazu, ukoliko se koristi pretpojačavač sa  $A_2 = 100V/V$ , a na oba stepena primeni NPS sa ukupnim faktorom povratne sprege  $B=1$  kao na slici.**



07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 72

### Tipovi realizacije pojačavača sa NPS

07. decembar 2017. 73

### 1. Tipovi realizacije NPS

**Vraćeni signal sa izlaza proporcionalan je:**

**Naponu**

$R_{ir} < R_{ia}$

**ili**

**Struji**

$R_{ir} > R_{ia}$

**Kolo povratne spregne menja izlaznu otpornost (impedansu)!!!**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 75

### 1. Tipovi realizacije NPS

**Priključivanje na ulazu:**

**Paraleno**

$R_{ur} < R_{ua}$

**Redno**

$R_{ur} > R_{ua}$

**Kolo povratne spregne menja ulaznu otpornost (impedansu)!!!**

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 74

### 1. Tipovi realizacije NPS

- a) Paralelno naponska
- b) Redno strujna
- c) Paralelno strujna
- d) Redno naponska

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 76

**1. Tipovi realizacije NPS**

**a) Paralelno naponska**

$$R_{mr} = \frac{v_i}{i_u} = \frac{R_m}{1 - R_m \cdot B}$$

$$R_{ur} = \frac{R_{ua}}{(1 - R_m B)} < R_{ua}$$

$$R_{ir} = \frac{R_{ia}}{(1 - R_m B)} < R_{ia}$$

(d)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 77

**1. Tipovi realizacije NPS**

**c) Paralelno strujna**

$$A_{sr} = \frac{i_i}{i_u} = \frac{A_s}{1 - A_s \cdot B}$$

$$R_{ur} = \frac{R_{ua}}{(1 - A_s B)} < R_{ua}$$

$$R_{ir} = R_{ia}(1 - A_s B) > R_{ia}$$

(b)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 79

**1. Tipovi realizacije NPS**

**b) Redno strujna**

$$G_{mr} = \frac{i_i}{v_u} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot B}$$

$$R_{ur} = R_{ua}(1 - G_m B) > R_{ua}$$

$$R_{ir} = R_{ia}(1 - G_m B) > R_{ia}$$

(c)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 78

**1. Tipovi realizacije NPS**

**d) Redno naponska**

$$A_r = \frac{v_i}{v_u} = \frac{A}{1 - A \cdot B}$$

$$R_{ur} = R_{ua}(1 - AB) > R_{ua}$$

$$R_{ir} = \frac{R_{ia}}{(1 - AB)} < R_{ia}$$

(a)

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 80

Za one koji žele da nauče više

### Projektovanje pojačavača sa NPS

81

### Projektovanje pojačavača sa NPS

#### 1. Izabrati odgovarajući tip PS.

Tip sprege	$x_u$	$y_i$	Pojačanje	Ulazna impedansa	Izlazna impedansa
redno naponska	$v_u$	$v_i$	$A_r = \frac{A}{1 - A \cdot B}$	$R_{ua}(1 - AB)$	$\frac{R_{ia}}{(1 - AB)}$
Redno strujna	$v_u$	$i_i$	$G_{mr} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot B}$	$R_{ua}(1 - G_m B)$	$R_{ia}(1 - G_m B)$
Paralelno naponska	$i_u$	$v_i$	$R_{mr} = \frac{R_m}{1 - R_m \cdot B}$	$\frac{R_{ua}}{(1 - R_m B)}$	$\frac{R_{ia}}{(1 - R_m B)}$
Paralelno strujna	$i_u$	$i_i$	$A_{sr} = \frac{A_s}{1 - A_s \cdot B}$	$\frac{R_{ua}}{(1 - A_s B)}$	$R_{ia}(1 - A_s B)$

\*Izrazi važe za idealne pojačavače;

Kolo povratne sprege **OPTEREĆUJE izlaz** i **MENJA ulaznu impedansu!!!**

07. decembar 2017.

Povratna sprega

83

### Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

1. Izabrati odgovarajući tip PS (pojačanje,  $R_u$ ,  $R_{iz}$ ).
2. Izabrati odgovarajuću konfiguraciju za kolo PS i izračunati vrednosti otpornosti.
3. Analizirati kolo da bi se proverili projektni zahtevi

07. decembar 2017.

Povratna sprega

82

### Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

#### 2. Izabrati odgovarajuću konfiguraciju za kolo PS i izračunati vrednosti otpornosti.

##### Pravila:

- Kod redne PS vrednosti otpornika treba da budu što manje da bi se umanjila redukcija pojačanja otvorene petlje (**da bi se što veća struja isporučila potrošaču**)
- Kod paralelne PS birati što veće vrednosti otpornika da bi se što manje degradirali signali i na ulazu i na izlazu (naponski razdelnik)

07. decembar 2017.

Povratna sprega

84

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

**3. Analizirati kolo da bi se proverili projektni zahtevi**

**U ovu svrhu najefikasnije je koristiti programe za analizu kola (npr. Spice)**

07. decembar 2017. Povratna sprega 85

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

**Primer:**

**Zahtevi:**

**Napon na potrošaču mora da bude 10 puta veći od napona na ulazu.**

**Vrednost signala na izlazu mora što manje da zavisi od  $R_g$  i  $R_p$ .**

07. decembar 2017. Povratna sprega 87

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

**Primer:**

**Projektovati kolo povratne sprega za diferencijalni pojačavač koji ima naponsko pojačanje u otvorenoj petlji  $A=80\text{dB}$ , ulaznu otpornost od  $R_i=5\text{k}$ , izlaznu otpornost od  $R_o=100\ \Omega$  ako se pobuđuje izvorom čija otpornost varira oko nominalne vrednosti od  $R_g=2\text{k}$ , a opterećen je porošaćem čija otpornost varira oko vrednosti od  $R_p=50\ \Omega$ .**

07. decembar 2017. Povratna sprega 86

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

**Rešenje:**

**1. Izbor tipa povratne sprega**

**Da bi odziv bio nezavisan od promena otpornosti  $R_g$  i  $R_p$  potrebno je izabrati konfiguraciju koja ima veliku ulaznu i malu izlaznu otpornost u zatvorenoj petlji.**

**To ispunjava redno-naponska sprega**

07. decembar 2017. Povratna sprega **Moguće rešenje** 88

**Projektovanje pojačavača sa NPS** Za one koji žele da nauče više

**Rešenje:**

**2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS**

Traži se  $A_r=10$ , a zna se da je  $A=10000$ . Ukoliko je ispunjeno  $AB \gg 1$ , tada je  $A_r = -1/B = 10$ , odnosno, potrebno je  $B = -0.1$ .

Proverom se utvrđuje da je za  $B = -0.1$ ,  $AB = 1000 \gg 1$ .

$$B = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} = -0.1$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.1 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 9$$

07. decembar 2017. Povratna sprega 89

**Projektovanje pojačavača sa NPS** Za one koji žele da nauče više

**Rešenje:**

**2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS**

Kolo povratne sprega opterećuje izlaz sa  $R_{22} = R_1 + R_2$  (paralelno vezano sa  $R_p$ ), zato treba izabrati  $R_1 + R_2 \gg R_i = 100$ .

Istovremeno, kolo PS remeti ulaznu otpornost pojačavača sa  $R_{11} = R_2 / R_1$ , pa treba izabrati  $R_2 \ll R_u = 5k$ , da se ne bi oslabio ulazni signal.

07. decembar 2017. Povratna sprega 91

**Analiza pojačavača sa NPS** Za one koji žele da nauče više

**Redno-naponska**

$$A_r = \frac{V_i}{V_u} = \frac{A}{1 - A \cdot B}$$

$$A = \frac{V_i}{V_{ua}}$$

$$A_r = \frac{V_i}{V_g}$$

$$B = \frac{V_{ub}}{V_i}$$

$$A_r = \frac{V_i}{V_u} = \frac{A_r}{1 - A_r \cdot B}$$

gde je

07. decembar 2017. Povratna sprega 90

**Projektovanje pojačavača sa NPS** Za one koji žele da nauče više

**Rešenje:**

**2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS**

Kompromisno rešenje je da  $R_2 = 500\Omega \ll 5k$ , a onda je  $R_1 = 4,5k$ .

S obzirom da  $A_r$  zavisi od  $R_2$  i  $R_1$ , bira se  $R_2$  sa tolerancijom 1% i vrednost  $499\Omega$ , dok se  $R_1$  realizuje kao redna veza otpornika od  $4,32k$  i potencijetrom od  $500\Omega$ .

07. decembar 2017. Povratna sprega 92

Za one koji žele da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

Rešenje:

**3. Analiza**

Sa izabranim vrednostima dobija se

$R_{II} = (0.5 \times 4.5) / 5 = 0.45 \text{ k}\Omega$

$R_{22} = R_1 + R_2 = 5 \text{ k}\Omega$

$A_R = 2237$

$1 - B A_R = 225$

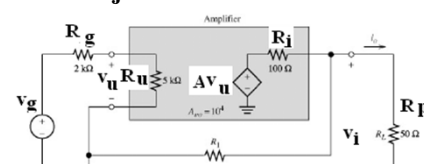
$A_r = 9.94$

$R_{ur} = R_{uR} (1 - B A_R)$

$R_{ur}' = R_{ur} - R_g$

$R_{ur}' = 1.67 \text{ M}\Omega$

07. decembar 2017.      Povratna sprega      93



$R_{iR} = R_i \parallel R_{22} \parallel R_p = 33.11 \Omega$

$R_{ir} = [R_{iR} / (1 - B A_R)] = 0.147 \Omega$

$R_{ir}' = R_{ir}' \parallel R_p$

$R_{ir}' = 0.148 \Omega$

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

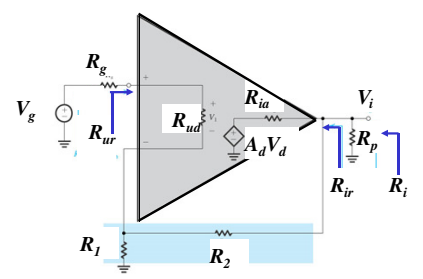
07. decembar 2017.      Povratna sprega      95


Za one koji žele da nauče više

**Domaći 9.4:**

Operacioni pojačavač sa slike ima diferencijalno pojačanje  $A_d = 80 \text{ dB}$ , konačnu ulaznu otpornost  $R_{ud} = 100 \text{ k}\Omega$  i izlaznu otpornost  $R_{ia} = 1 \text{ k}\Omega$ . Odrediti  $A_r = V_i / V_g$ ,  $R_{ur}$ , i  $R_{ir}$ . Poznato je  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_p = 2 \text{ k}\Omega$ .

07. decembar 2017.      Povratna sprega      94





**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

U opštem slučaju pojačanje pojačavača sa povratnom spregom zavisi od frekvencije  $\omega$ .

$$A_r = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)}$$

Čim postoji povratna sprega, postoji opasnost da pri nekim uslovima ona postane pozitivna.

Na nekoj frekvenciji ( $\omega_{180}$ ) može da se desi da se faza signala iz kola PS promeni za  $180^\circ$ . To znači da su se stvorili uslovi da povratna sprega postane pozitivna i da pojačavač postane nestabilan.

07. decembar 2017.      Povratna sprega      96



**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

Od čega zavisi i kako odrediti stabilnost pojačavača?

$$A_r = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)}$$

Ponašanje pojačavača u vremenskom domenu zavisi od frekvencijskih karakteristika, odnosno od položaja nula [redacted] i polova [redacted] funkcije pojačanja.

Zato se analizom položaja nula i polova funkcije pojačanja mogu izvesti korisni zaključci o ponašanju pojačavača u vremenskom domenu.

07. decembar 2017. Povratna sprega 97

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

Razmotrimo pojačavač koji ima par polova definisanih sa

$$s_{1,2} = \sigma \pm j\omega$$

Ukoliko se javi bilo kakav šum na ulazu (uključujući se napajanje) napon na izlazu tog pojačavača biće:

$$v(t) = e^{\sigma t} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) = 2e^{\sigma t} \cos(\omega \cdot t)$$

Ovo je prostoperiodični signal sa frekvencijom oscilovanja  $\omega$ , dok je anvelopa sinusoide određena sa  $2e^{\sigma t}$

07. decembar 2017. Povratna sprega 99

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

Pozitivna povratna sprega manifestuje se povećanjem signala na izlazu u odnosu na pojačanje bez PS.

Da bi se to desilo, imenilac izraza za pojačanje treba da postane manji od 1.

$$A_r = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)}$$

Zato je za ispitivanje stabilnosti (uslova nastanka pozitivne PS) dovoljno posmatrati polove funkcije pojačanja.

07. decembar 2017. Povratna sprega 98

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---


$$v(t) = 2e^{\sigma t} \cos(\omega \cdot t)$$

Pojačavač je stabilan ako se amplituda izlaznog signala, uzrokovanog šumom na ulazu, smanjuje.

To je moguće samo ukoliko je  $\sigma < 0$ .

**Da bi pojačavač bio stabilan, polovi moraju da budu u levoj poluravni, odnosno  $\sigma < 0$ !**

07. decembar 2017. Povratna sprega 100

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

$v(t) = 2e^{\sigma \cdot t} \cos(\omega \cdot t)$   
 anvelopa

**Kada je  $\sigma < 0$ , pojačavač je stabilan jer amplituda opada**

**Kada je  $\sigma > \omega$ , oscilacije se priguše u intervalu manjem od  $1/f$**

07. decembar 2017. Povratna sprega 101

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

$v(t) = 2e^{\sigma \cdot t} \cos(\omega \cdot t)$   
 na granici stabilnosti  $\sigma=0$

$v(t) = 2 \cdot e^{0 \cdot t} \cos(\omega \cdot t) = 2 \cdot \cos(\omega \cdot t)$

07. decembar 2017. Povratna sprega 103

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

$v(t) = 2e^{\sigma \cdot t} \cos(\omega \cdot t)$

**Kada je  $\sigma > 0$ , pojačavač je nestabilan jer amplituda raste**

**Kada je  $\omega=0$ , nema oscilacija ali signal raste**

07. decembar 2017. Povratna sprega 102

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Očigledno je da će pojačavač biti stabilniji ukoliko su polovi udaljeni od  $j\omega$  ose.**

**U tom kontekstu treba sagledati uticaj NPS**

07. decembar 2017. Povratna sprega 104

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Pojačavač sa jednim polom**

$A(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + j\omega\omega_p)}$  Pojačanje u otvorenoj petlji

Sa povratnom spregom

$$A_r(j\omega) = \frac{\frac{A_0}{(1 + j\omega\omega_p)}}{1 - \frac{A_0 B}{(1 + j\omega\omega_p)}} = \frac{\cancel{(1 + j\omega\omega_p)} \frac{A_0}{(1 + j\omega\omega_p)}}{\cancel{(1 + j\omega\omega_p)} - A_0 B} = \frac{A_0}{(1 - A_0 B)} = \frac{A_{ro}}{(1 - A_0 B)}$$

$$A_r(j\omega) = \frac{A_{ro}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_p(1 - A_0 B)}} \Rightarrow \omega_{pr} = \omega_p(1 - A_0 B)$$

**Uvođenje NPS pomera pol od  $j\omega$  ose za  $(1 - A_0 B)$  puta.**

**Zato je pojačavač stabilniji!**

07. decembar 2017. Povratna sprega 105

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Praktično, pojačavači imaju više od jednog pola.**

**Pol koji je bliži  $j\omega$  osi naziva se dominantni pol.**

**Teži se da se projektuje pojačavač kod koga je dominantni pol što dalje od  $j\omega$  ose.**

**Pojačavač sa dva pola.**

$$A(s) = \frac{A_0}{(1 + s/\omega_1)(1 + s/\omega_2)}$$

$$A_r = \frac{A(s)}{(1 + A(s)B)}$$

$$A_r = \frac{A_{ro}}{(1 + s/\omega_r)(1 + s/\omega_2)}$$

07. decembar 2017. Povratna sprega 107

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Pojačavač sa jednim polom**

**Kada  $A_0 B$  raste od 0 do  $\infty$ ,  $\omega_{pr}$  menja se od  $\omega_p$  ka  $-\infty$ , a NF pojačanje se smanjuje:**

**Uvek stabilan**

07. decembar 2017. Povratna sprega 106

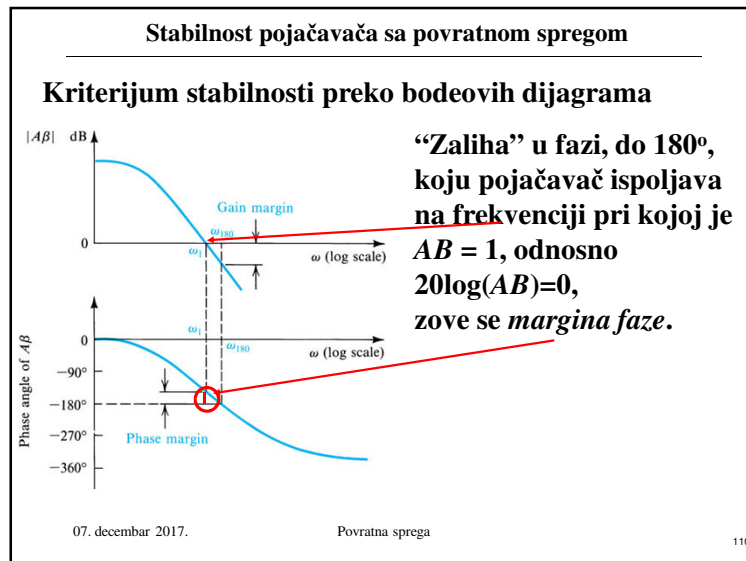
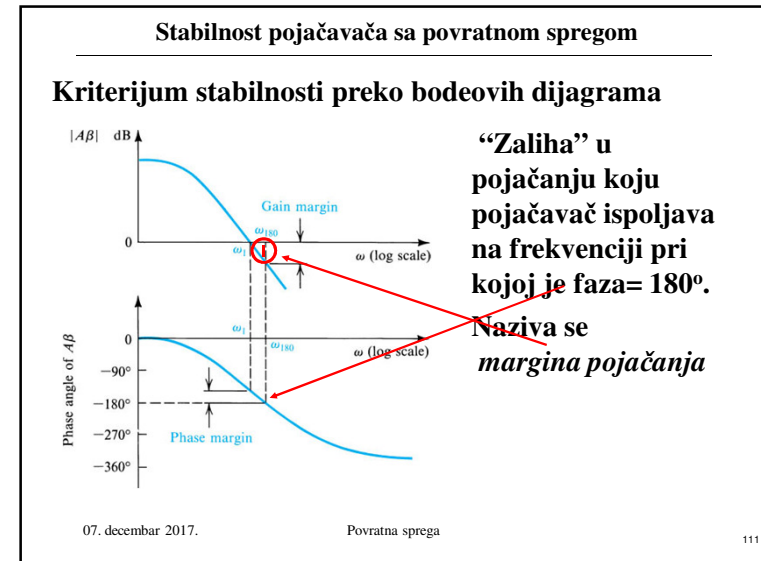
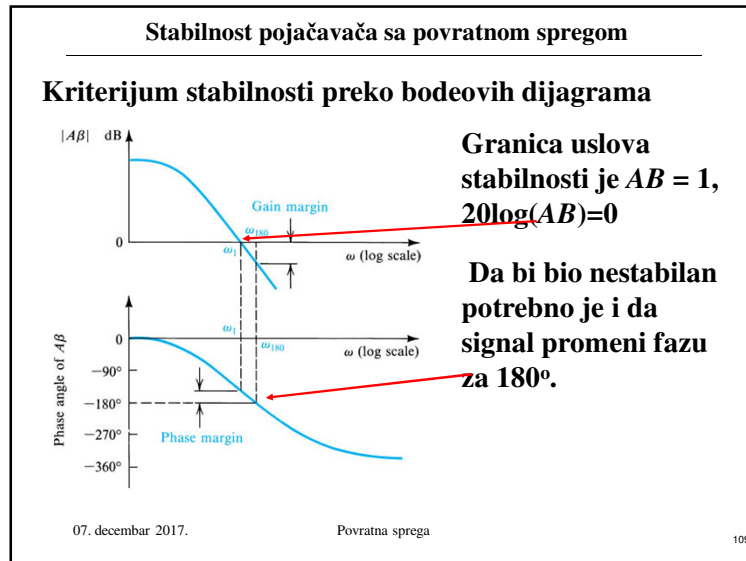
**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Pojačavač sa tri pola**

**stabilan      nestabilan**

**Uslovno stabilan**

07. decembar 2017. Povratna sprega 108



**Uticaj negativne povratne spregre**

Da se podsetimo:

Kakav uticaj NPS ima na

- Osetljivost?
- nelinearna amplitudska izobličenja?
- Frekvencijsku karakteristiku?
- Šumove?

07. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 112

Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača



**Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)**



**Odziv pojačavača sa negativnom povratnom spregom osetljiv je na promenu parametara u kolu povratne sprega**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

113

Uticaj negativne povratne sprega na frekvencijsku karakteristiku



**Negativna povratna sprega utiče na proširenje propusnog opsega pojačavača.**

**Amplitudska karakteristika je ravnija, pa su i linearna izobličenja manja.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

115

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



**Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

114

Uticaj negativne povratne sprega na frekvencijsku karakteristiku



**Proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan (kod pojačavača sa  $f_v \gg f_n$ )**

**Negativna povratna sprega smanjuje pojačanje.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

116

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



**Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

117

Uticaj negativne povratne sprege

**Da se podsetimo:**

- „Pozitivne“ osobine NPS?
- „Neutralne“ osobine NPS
- „Negativne“ osobine NPS



07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

119

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



**Negativna povratna sprega utiče na smanjenje šuma generisanih unutar samog pojačavača.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

118

„Pozitivne“ osobine NPS



- **Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji).**
- **Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja.**
- **Negativna povratna sprega utiče na proširenje propusnog opsega pojačavača.**

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

120

„Pozitivne“ osobine NPS



- Amplitudska karakteristika je ravnija, pa su i linearna izobličenja manja.
- Negativna povratna sprega utiče na smanjenje šuma generisanih unutar samog pojačavača.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

121

“Negativne” osobine NPS



Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

123

“Neutralne” osobine NPS



- Odziv pojačavača sa negativnom povratnom spregom osetljiv je na promenu parametara u kolu povratne sprege.
- Proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan (kod pojačavača sa  $f_v \gg f_n$ ).
- Negativna povratna sprega smanjuje pojačanje.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

122



Šta smo naučili?

- Fizičko značenje negativne i pozitivne povratne sprege sa stanovišta pojačanja i odnosa faza ulaznog i vraćenog signala
- Pojačanje pojačavača sa povratnom spregom u funkciji pojačanja pojačavača u otvorenoj petlji i prenosne funkcije kola povratne sprege.
- Karakteristike pojačavača sa negativnom povratnom spregom.

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

124

124

Ispitna pitanja

1. Definicija funkcije povratne sprege i kružnog pojačanja pojačavača sa povratnom spregom.
2. Objasniti uticaj NPS na amplitudsku karakteristiku pojačavača
3. Objasniti uticaj NPS na nelinearna amplitudska izobličenja.
4. Objasniti uticaj NPS na šumove.
5. Osobine pojedinih realizacija pojačavača sa NPS sa stanovišta ulazne i izlazne otpornosti i pojačanja.
6. Uslov stabilnosti pojačavača iskazan preko polova prenosne funkcije.

07. decembar 2017.

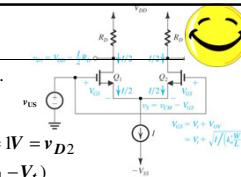
Pojačavači sa povratnom spregom

125

125

Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0,5V$ ,  $\mu_n C_{ox} \cdot W/L=2A=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .  
Poznato je  $I=0,4mA$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1,5V$  i  $R_D=2,5k\Omega$ .



d) za  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$   
 $V_{DS \min} = V_{GS1} - V_t = v_{D1} - v_{S \max} \Rightarrow v_{S \max} = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t)$   
 $v_{S \max} = v_{US \max} - V_{GS1} \Rightarrow v_{US \max} = v_{S \max} + V_{GS1} = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t) + V_{GS1} = v_{D1} + V_t$   
 $v_{US \max} = V_{DD} - R_D i_{D1} + V_t = 1,5V$

e)  $A_d = \left. \frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \right|_{r_o \rightarrow \infty} = -g_m R_D$   
 $g_m = \frac{2i_{D1}}{V_{GS1} - V_t} = \frac{I}{V_{GS1} - V_t} = \frac{0,4mA}{0,32V} = 1,25mA/V$   
 $A_d = -g_m R_D = 1,25mA/V \cdot 2,5k\Omega = -3,125V/V$   
 $A_c = \left. \frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D + 2(g_m r_o + 1)R_S} \right|_{r_o \rightarrow \infty, R_S \rightarrow \infty} = 0$

$CMRR = A_d / A_c \rightarrow \infty$

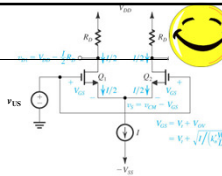
07. decembar 2017.

Višestepeni pojačavači

E7.1 127

Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0,5V$ ,  $\mu_n C_{ox} \cdot W/L=2A=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .  
Poznato je  $I=0,4mA$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1,5V$  i  $R_D=2,5k\Omega$ .



a)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$

$i_{D1} = A(V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS1} = V_t + \sqrt{\frac{i_{D1}}{A}} = 0,5V + \sqrt{\frac{0,2}{2}}V = 0,82V = V_{GS2}$

$v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0 - 0,82 = -0,82V$

$v_{D1} = V_{DD} - R_D i_{D1} = 1,5V - 2,5k \cdot 0,2mA = 1V = v_{D2}$

b) kao pod a)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$

$v_S = v_{US} - V_{GS1} = -0,2V - 0,82V = -1,02V$

c) kao pod a)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$

$v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0,9V - 0,82V = +0,08V$

07. decembar 2017.

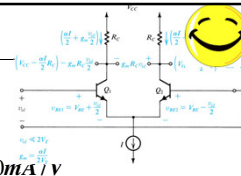
Višestepeni pojačavači

E7.1

126

Domaći 8.2 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $\alpha=1$ ,  $V_{BE}=0,7V$ .  
Poznato je  $I=1mA$ ,  $V_{CC}=15V$  i  $R_C=10k\Omega$ ,  $v_{BE2}=5+0,005\sin(\omega t)V$   
 $v_{BE2}=5-0,005\sin(\omega t)V$ .



a) za  $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \alpha \cdot I/2 = 0,5mA$ ;

$g_{m1} = g_{m2} = g_m = I_C / V_T = 0,5mA / 0,025V = 20mA/V$

$v_{ud} = v_{BE1} - v_{BE2} = 0,01\sin(\omega t)V$

$i_{c1} = g_m (v_{ud} / 2) = 0,1\sin(\omega t)mA$ ;  $i_{c2} = -g_m (v_{ud} / 2) = -0,1\sin(\omega t)mA$

$i_{C1} = 0,5 + 0,1\sin(\omega t)mA$ ;  $i_{C2} = 0,5 - 0,1\sin(\omega t)mA$

b)  $V_{C1} = V_{C2} = V_C = V_{CC} - R_C I_C = 15V - 10k\Omega \cdot 0,5mA = 10V$

$v_{c1} = -R_C i_{c1} = -1\sin(\omega t)V$

$v_{c2} = -R_C i_{c2} = +1\sin(\omega t)V$

$v_{C1} = V_C + v_{c1} = 10 - 1 \cdot \sin(\omega t)V$ ;  $v_{C2} = V_C + v_{c2} = 10 + 1 \cdot \sin(\omega t)V$

c)  $A_d = \left( \frac{v_{C1} - v_{C2}}{v_{du}} \right) = -\frac{2}{0,01} = 200V/V$

07. decembar 2017.

Višestepeni pojačavači

E7.1

128



**Domaći 8.3 Rešenje:**

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox}=160\mu A/V^2$ ,  $V_{tn}=0.7V$ ,  $\mu_p C_{ox}=40\mu A/V^2$ ,  $V_{tp}=-0.8V$ ,  $V_{th}=-V_{tp}=-10V$ .

Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je  $I_{REF}=90\mu A$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=2.5V$ . Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

$$(W/L)_5 = (W/L)_7 = (W/L)_8 \Rightarrow I_{D5} = I_{D7} = I_{D8} = I_{REF} = 90\mu A$$

$$(W/L)_1 = (W/L)_2 \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_{REF} / 2 = 45\mu A$$

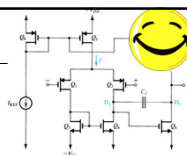
$$I_{D3} = I_{D1} = 45\mu A; \quad I_{D4} = I_{D2} = 45\mu A; \quad I_{D6} = I_{D7} = 90\mu A$$

$$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \mu C_{ox} (W/L)(V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_D}{A}}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}; \quad r_o = \frac{V_A}{I_D}, \text{ Zamenom vrednosti za svaki tranzistor}$$

(Q1, Q2, Q5, Q7 i Q8 pMOS), (Q3, Q4, i Q6 nMOS)

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
W/L	20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8
I <sub>D</sub> (μA)	45	45	45	45	90	90	90	90
V <sub>GS</sub> (V)	1.1	1.1	1.	1.	1.1	1	1.1	1.1
g <sub>m</sub> (mA/V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
r <sub>o</sub> (kΩ)	222	222	222	222	111	111	111	111



Za one koji žele da nauče više

Sledeće nedelje:

- Oscilatori – pozitivna povratna sprega

Na web adresi <http://leda.elfak.ni.ac.yu>

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

07. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

131

**Domaći 8.3 Rešenje:**

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox}=160\mu A/V^2$ ,  $V_{tn}=0.7V$ ,  $\mu_p C_{ox}=40\mu A/V^2$ ,  $V_{tp}=-0.8V$ ,  $V_{th}=-V_{tp}=-10V$ .

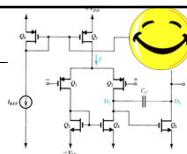
Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je  $I_{REF}=90\mu A$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=2.5V$ . Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

$$A_1 = -g_{m1}(r_{o2} \parallel r_{o4}) = -0.3mA/V \cdot (222k\Omega \parallel 222k\Omega) = -33,33V/V$$

$$A_2 = -g_{m6}(r_{o6} \parallel r_{o7}) = -0.6mA/V \cdot (111k\Omega \parallel 111k\Omega) = -33,33V/V$$

$$A = A_1 \cdot A_2 = 1110,89V/V$$

$$a = 20 \log(A) = 60,91 \text{ dB}$$



07. decembar 2017.

Višestepeni pojačavači

E7.1 130