


## Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kakanje)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2019.)	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!**

06. decembar 2018 1

## Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO


Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kakanje)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2019.)	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)**

06. decembar 2018 2

**Da se podsetimo**



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

**Koje osobine?**

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

06. decembar 2018 Višestepeni pojačavači 3

Pojačavači sa povratnom spregom (feedback)

06. decembar 2018 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. Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

5

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)

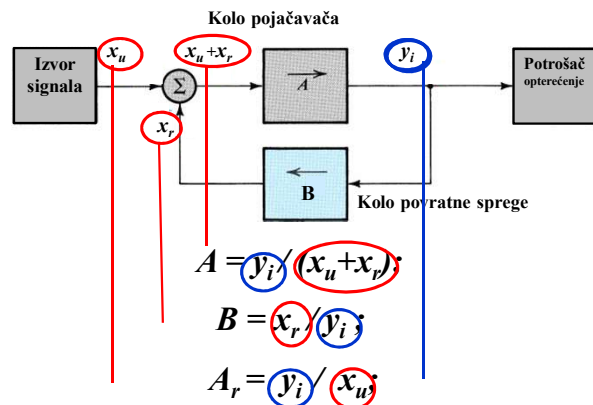
**y** predstavlja izlazni signal  
(napon ili struju na izlazu pojačavača)

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

6

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**



$$A = y_i / (x_u + x_r)$$

$$B = x_r / y_i$$

$$A_r = y_i / x_u$$

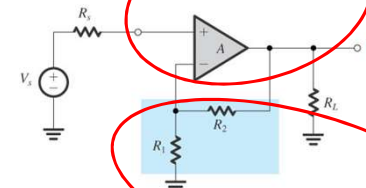
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

7

**Primer realne realizacije**

**Kolo pojačavača**



**Kolo povratne sprege**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

8

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      9

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      10

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

Veza između:

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      11

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

Kružno pojaćanje  $\Phi(\omega) = A(\omega)B(\omega)$

Zavisi od frekvencije

06. decembar 2018      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**

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 13

**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)**

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

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

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

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

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 14

**Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.**

*U literature se sreće ovaj izraz sa znakom "+", ali ako se koristi kolo za oduzimanje na ulazu*

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

Mi ćemo koristiti  $A_r = \frac{A}{1 - AB}$

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 15

**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**

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 16

# Povratna sprega

$A_r = \frac{A}{1-AB}$   
 $|1-AB| < 1 \Rightarrow A_r > A$  **POZITIVNA**

Signal,  $x_p$ , 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**

06. decembar 2018 17

$A_r = \frac{A}{1-AB}$   
 $|1-AB| < 1 \Rightarrow A_r > A$  **POZITIVNA**

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

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

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 18

$A_r = \frac{A}{1-AB}$   
 $1-AB > 1 \Rightarrow A_r < A$  **NEGATIVNA**

Signal,  $x_p$ , 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 sprege ne obrće fazu (otporno kolo)  $B > 0$ , tada je neophodno da  $A < 0$ , odnosno da pojačavač obrće fazu.  
**(Zajednički emitor/sors)**

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 19

$A_r = \frac{A}{1-AB}$   
 $1-AB > 1 \Rightarrow A_r < A$  **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 amplitudska izobličenja)
4. Smanjuje šumove generisane unutar pojačavača

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 20

**Uticaj negativne povratne sprege  
na osetljivost pojačavača**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

21

**Uticaj 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,...

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

22

**Uticaj 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.**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

23

**Uticaj 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  $R_D=4\text{k5}$**

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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

24

Uticaj 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 uticaj može da se smanji kod pojačavača sa povratnom spregom?

Uticaj 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:

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

Uticaj 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 ("jača" sprega).

Uticaj 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  $\left( \frac{\partial A}{A} \right)$

Uticaj 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

**$98 < A_r < 102$**

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

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

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

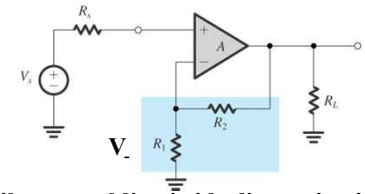


Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)



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

**Domaći 9.1:**



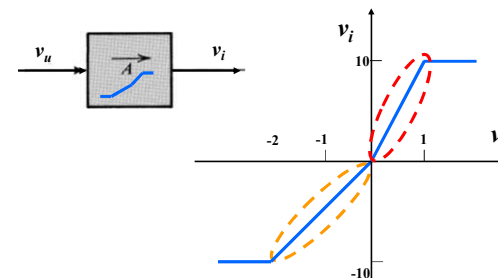
U kolu sa slike upotrebljen je idealizovani pojačavač sa  $A=100\text{dB}$ .  
Odrediti:

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

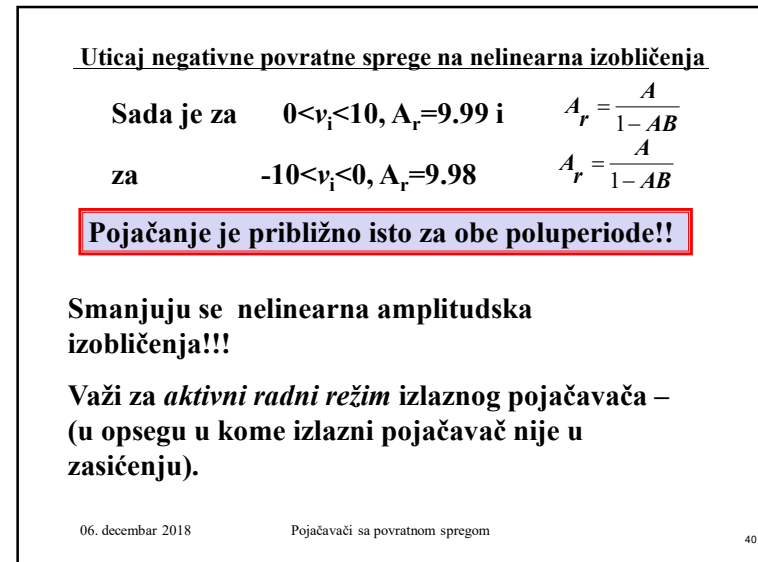
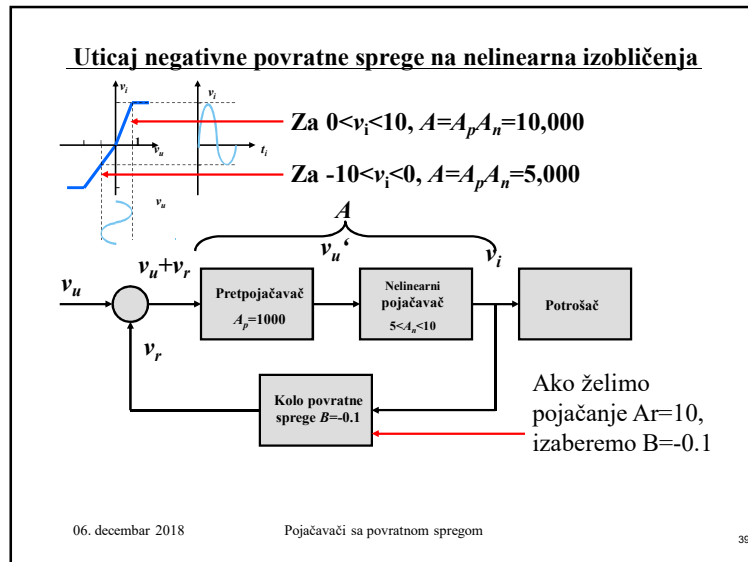
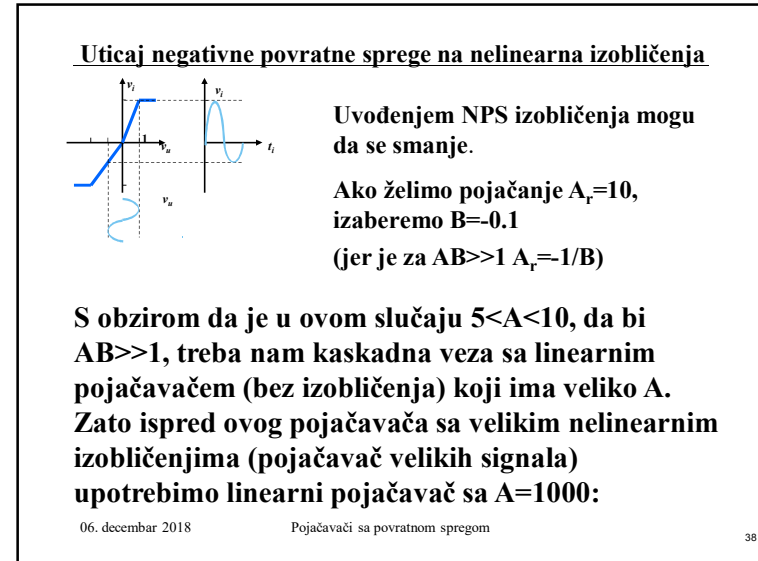
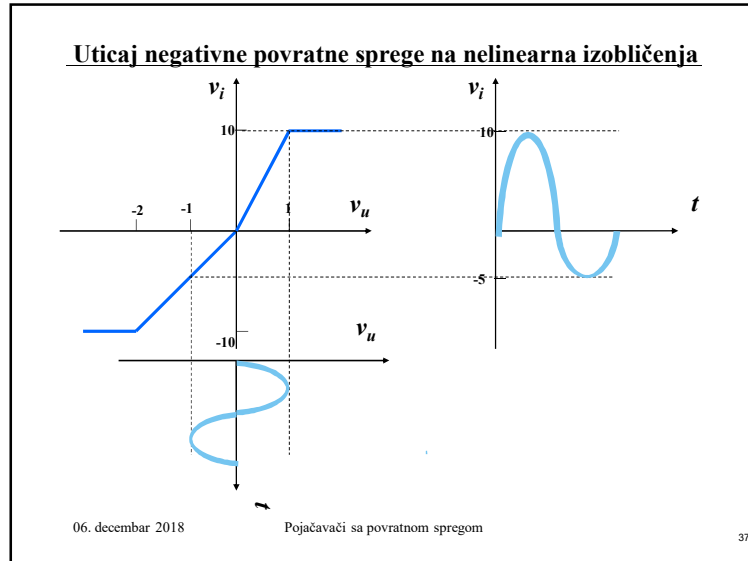
(Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)

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

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  $-2 < v_u < 0$ .



Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne spregne 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

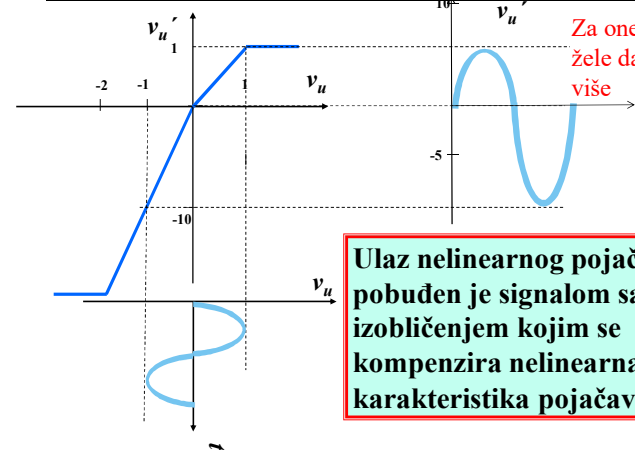
za  $-2 < v_u < 0$ ,  $v_u' = (1000/501) \cdot v_u = 1.996 \cdot v_u$

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

41

Uticao negativne povratne spregne na nelinearna izobličenja



Za one koji žele da nauče više

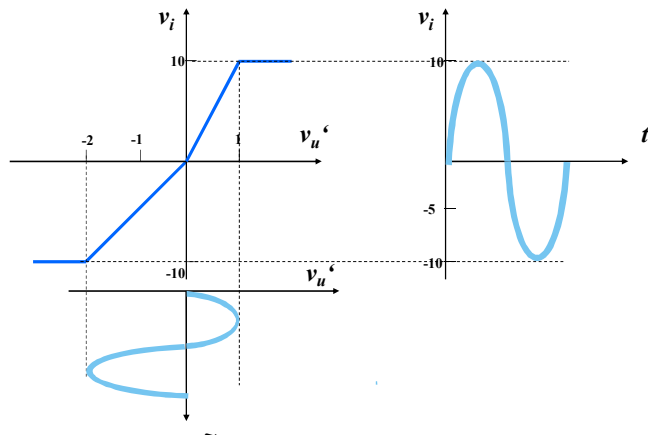
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

42

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne spregne na nelinearna izobličenja



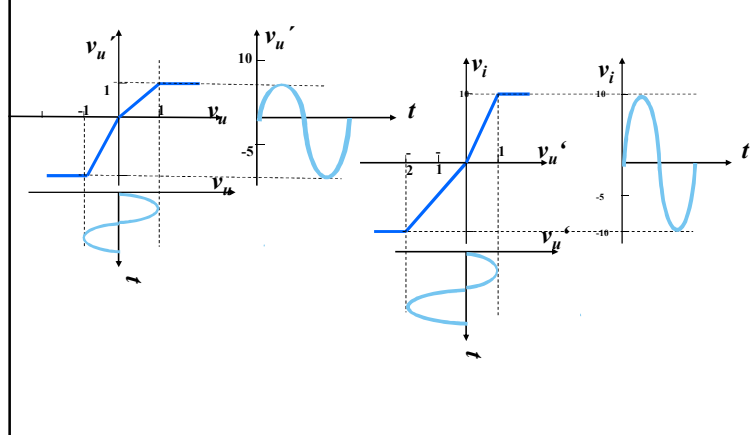
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

43

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne spregne na nelinearna izobličenja



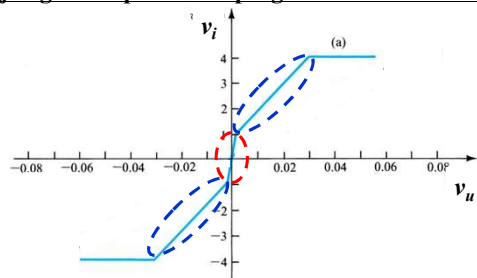
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

44

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne spregu na nelinearna izobličenja



Nelinearna prenosna karakteristika sa slike prikazuje pojačanje u otvorenoj petlji (bez PS) od  $A_1=1000$  u okolini  $v_i=0$  i  $A_2=100$  van tog opsega.

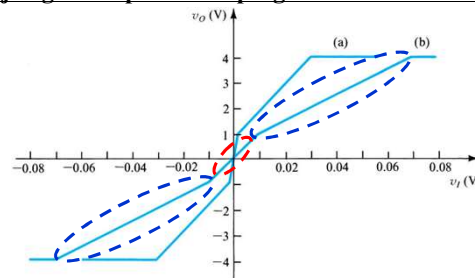
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

45

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne spregu na nelinearna izobličenja



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).

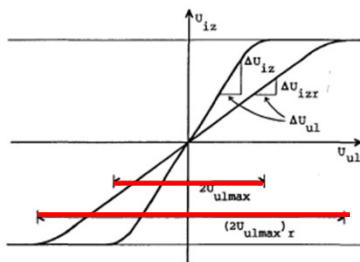
Očigledno je smanjena nelinearnost karakteristike.

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

46

Uticaj negativne povratne spregu na nelinearna izobličenja



Sl. 6.1.2 Ilustracija uticaja negativne povratne spregu na nelinearna izobličenja.

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.

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

47

Uticaj negativne povratne spregu na nelinearna izobličenja

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

Jedini način da se smanje nelinearna amplitudska izobličenja jeste uvođenje negativne povratne spregu.

Najčešće se ona primenjuje u poslednjem pojačavačkom stepenu.

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

48

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



**Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja**

**Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku**

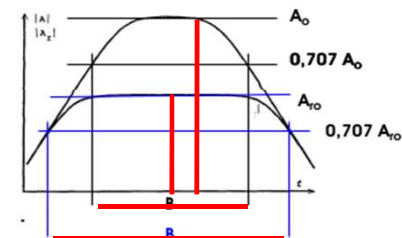
Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

**Promena amplitudske i fazne karakteristike direktno se odlikava na odziv signala, odnosno na linearna amplitudska 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.**

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku 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!.**

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg?

<p>Na niskim,</p> $A_n = \frac{A_o}{1 - j \frac{f_n}{f}}$ $A_{nr} = \frac{A_n}{1 - A_n B}$	<p>srednjim</p> $A_o$ $A_{or} = \frac{A_o}{1 - A_o B}$	<p>visokim <math>f</math></p> $A_v = \frac{A_o}{1 + j \frac{f}{f_v}}$ $A_{vr} = \frac{A_v}{1 - A_v B}$
--	--	--

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

53

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

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

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

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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

54

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku

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

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

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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

55

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

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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

56

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku 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! Konstantan je.**

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      57

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku**

---

**Za pojačavač bez PS za koji važi da pojačanje na NF raste, a na VF opada sa (20dB/dec):**

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

**Fazna karakteristika definisana je sa**

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      58

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku 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**

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

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

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      59

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku**

---

**Fazna karakteristika pojačavača bez i sa PS**

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

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

06. decembar 2018      Pojačavači sa povratnom spregom      60

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku**

---

**Kod kola sa PS**

**ispoljava se efekat nelinearnih faznih izobličenja.**

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

$$\Phi_{vr\varepsilon} = \arg \{A_r\} = \operatorname{arctg} \left( \frac{f_n}{f(1-A_oB)} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{f}{f_v(1-A_oB)} \right)$$

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 61

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku**

---

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

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

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

$$\Phi_{vr\varepsilon} = \operatorname{arctg} \left( \frac{ff_v}{1 - BA_o [1 + \varepsilon(x)]} \right)$$

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 62

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku**

---


$$\Phi_{vr\varepsilon} = \operatorname{arctg} \left( \frac{ff_v}{1 - BA_o [1 + \varepsilon(x)]} \right)$$

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

$$\Phi_{vr\varepsilon} \Big|_{B=0} = \operatorname{arctg} (f/f_v)$$

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 63

**Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijske 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  $f_v \gg f_n$ )

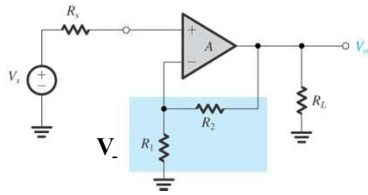
---

- smanjuje pojačanje.
- povećava nelinearna fazna izobličenja.

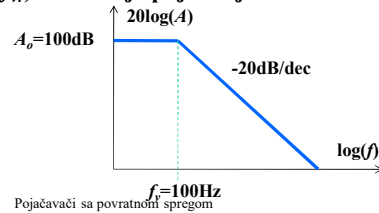
06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 64



**Domaći 9.2:**



U kolu iz primera 8.1 odrediti pojačanje pojačavača sa povratnom spregom pri niskim frekvencijama ( $A_{or}$ ) i gornju graničnu frekvenciju ( $f_{vr}$ ) ukoliko je pojačanje  $A$  definisano sa



06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

65

**Uticaj negativne povratne spregne na šumove**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

66

**Uticaj negativne povratne spregne 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:

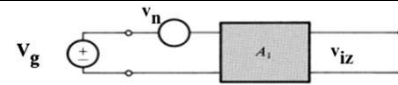
$$S/\check{S} = v_g/v_n$$

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

67

**Uticaj negativne povratne spregne 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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

68

**Uticaj negativne povratne sprega na šumove**

---


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

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

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

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

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 69

**Uticaj negativne povratne sprega na šumove**

---


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

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

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 70

**Uticaj negativne povratne sprega 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.

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 71

**Uticaj negativne povratne sprega na šumove**

---

😊

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

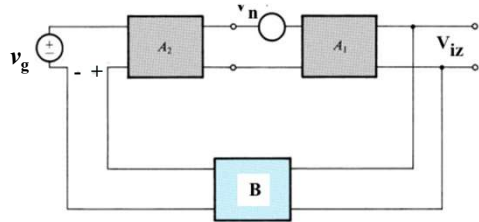
06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 72

**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.



06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

73

**Načini realizacije pojačavača sa NPS**

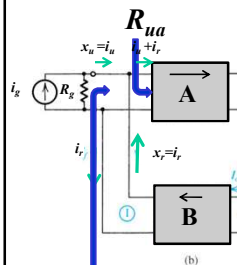
06. decembar 2018

74

**1. Tipovi realizacije NPS**

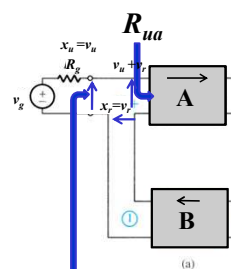
**Priključivanje na ulazu:**

**Paraleno**



$R_{ur} < R_{ua}$

**Redno**



$R_{ur} > R_{ua}$

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

06. decembar 2018

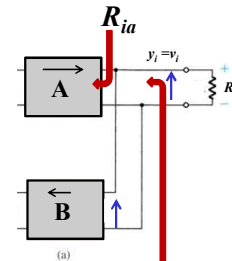
Pojačavači sa povratnom spregom

75

**1. Tipovi realizacije NPS**

**Vraćeni signal sa izlaza proporcionalan je:**

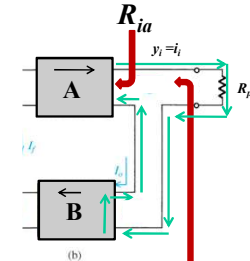
**Naponu**



$R_{ir} < R_{ia}$

**ili**

**Struji**



$R_{ir} > R_{ia}$

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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

76

**1. Tipovi realizacije NPS**

---

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

06. decembar 2018
Pojačavači sa povratnom spregom
77

**1. Tipovi realizacije NPS**

---

**a) Paralelno naponska**

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

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

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

06. decembar 2018
Pojačavači sa povratnom spregom
78

**1. Tipovi realizacije NPS**

---

**b) Redno strujna**

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

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

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

06. decembar 2018
Pojačavači sa povratnom spregom
79

**1. Tipovi realizacije NPS**

---

**c) Paralelno strujna**

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

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

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

06. decembar 2018
Pojačavači sa povratnom spregom
80

**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)

06. decembar 2018 Pojačavači sa povratnom spregom 81

Za one koji žele da nauče više

Projektovanje pojačavača sa NPS

82

**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

06. decembar 2018 Povratna sprega 83

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

**1. Izabrati odgovarajući tip PS.**

Tip sprega	$x_u$	$y_i$	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 sprega OPTEREĆUJE izlaz i MENJA ulaznu impedansu!!!**

06. decembar 2018 Povratna sprega 84

Za one koji žele  
da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

**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)

06. decembar 2018 Povratna sprega 85

Za one koji žele  
da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

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

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 86

Za one koji žele  
da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

**Primer:**

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 87

Za one koji žele  
da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

**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  $R_p$ .

06. decembar 2018 Povratna sprega 88

**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

Povratna sprega **Moguće rešenje**

06. decembar 2018 99

**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  $B=-0.1, AB=1000 \gg 1$ .

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

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

Povratna sprega

06. decembar 2018 90

**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

Povratna sprega

06. decembar 2018 91

**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.

Povratna sprega

06. decembar 2018 92

Za one koji žele da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

Rešenje:

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

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

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 93

Za one koji žele da nauče više

**Projektovanje pojačavača sa NPS**

Rešenje:

**3. Analiza**

Sa izabranim vrednostima dobija se:

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

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

$A_R=2237$  ("A" uz uticaj  $R_{11}$  i  $R_{22}$ )

$1-B A_R=225$

$A_r=9.94$

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

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

$R_{ur}'=1,67M\Omega$

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

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

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

$R_{ir}'=0,148\Omega$

06. decembar 2018 Povratna sprega 94

Za one koji žele da nauče više

**Domaći 9.4:**

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 95

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

06. decembar 2018 Povratna sprega 96



Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

Kad 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°. To znači da su se stvorili uslovi da povratna sprega postane pozitivna i da pojačavač postane nestabilan.

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.

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.

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 *anelopa* sinusoide određena sa

$$2e^{\sigma t}$$

**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  $\sigma < 0$ !**

06. decembar 2018 Povratna sprega 101

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

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

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

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 102

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

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

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

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 103

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

---

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

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

06. decembar 2018 Povratna sprega 104

**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**

06. decembar 2018Povratna sprega105

**Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

**Pojačavač sa jednim polom**  
Pojačanje u otvorenoj petlji

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + j\omega/\omega_p)}$$

**Sa povratnom spregom**

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

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

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

**Zato je pojačavač stabilniji!**

06. decembar 2018Povratna sprega108

**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**

06. decembar 2018Povratna sprega107

**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.**

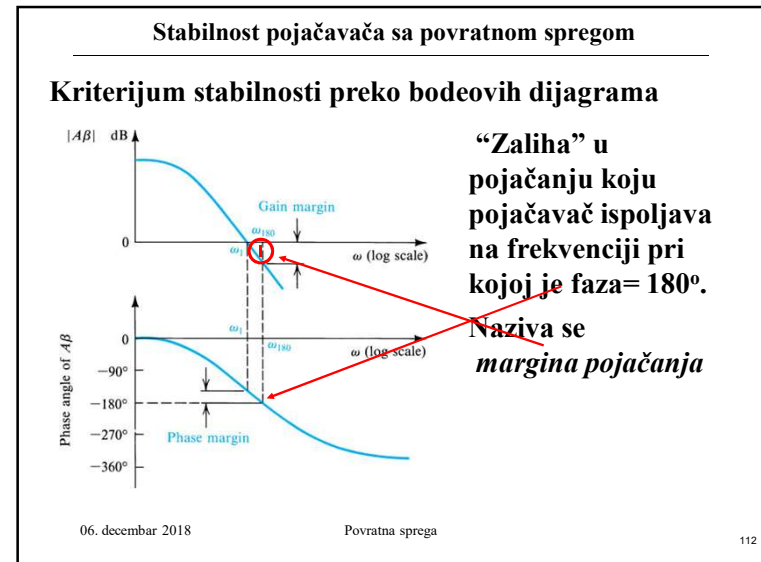
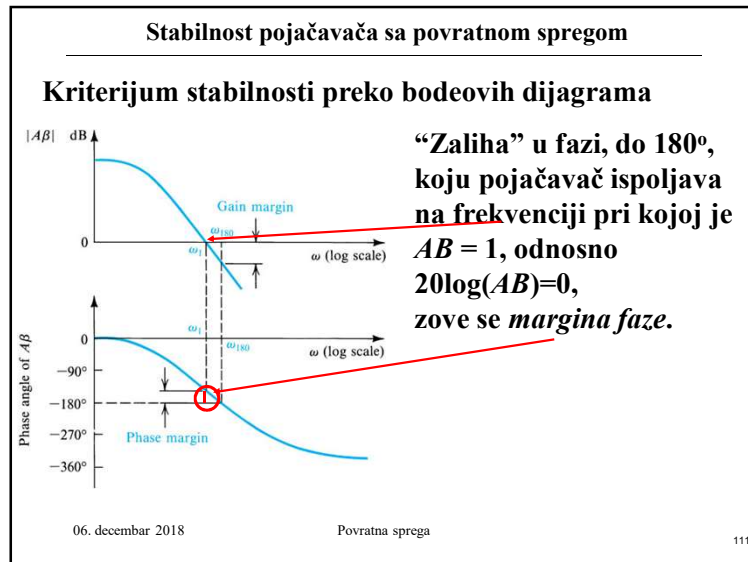
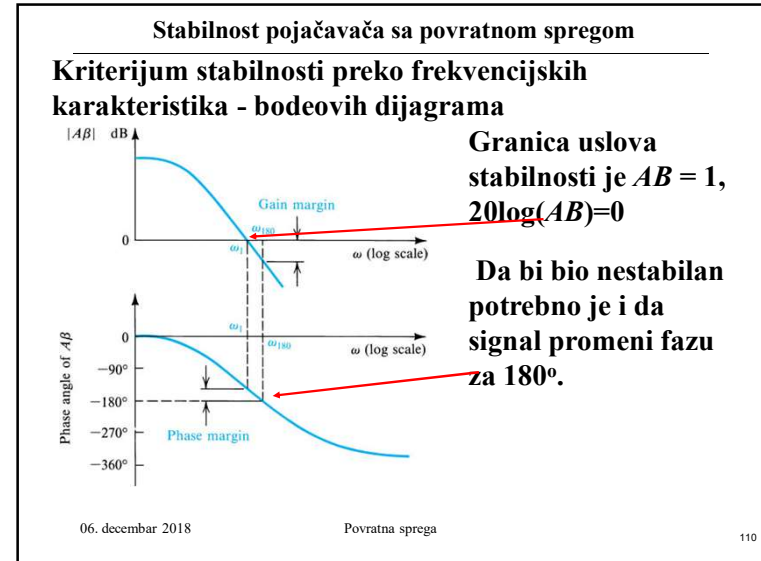
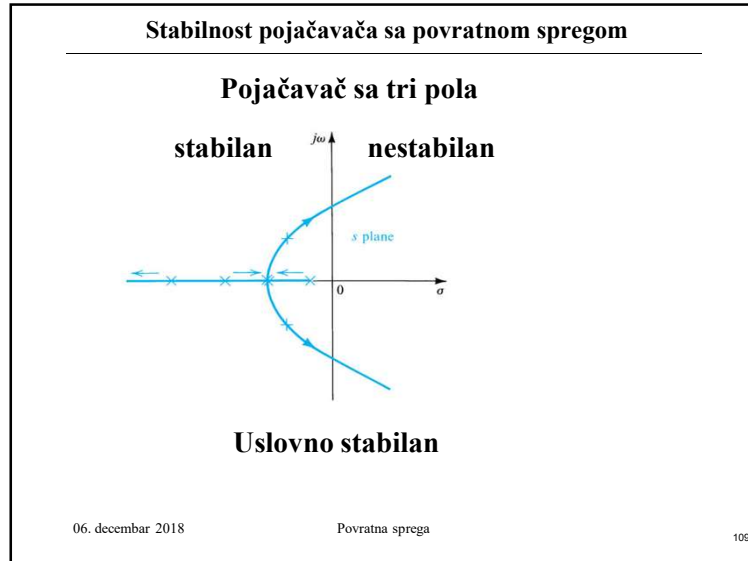
**Pojačavač sa dva pola.**

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

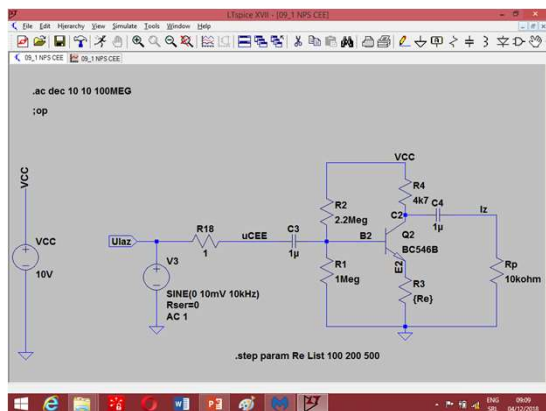
$$A_r = \frac{A(s)}{(1 + A(s)B)}$$

$$A_r = \frac{A_{ro}}{(1 + s/\omega_{1r})(1 + s/\omega_{2r})}$$

06. decembar 2018Povratna sprega108



Primeri primene negativne povratne sprege

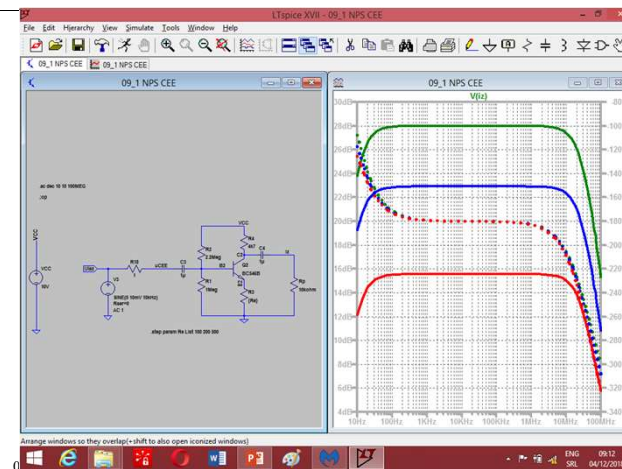


06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

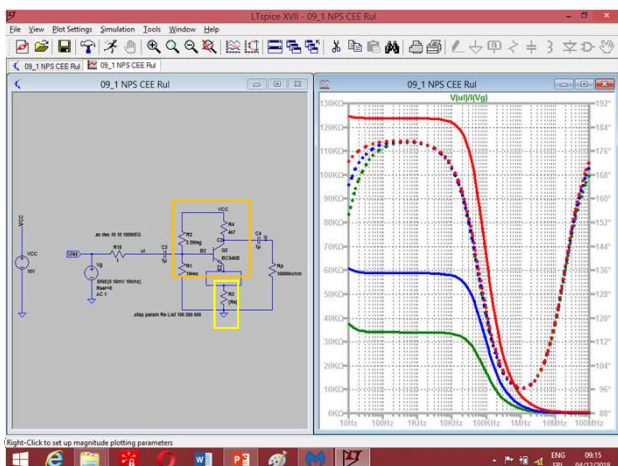
113

Primeri primene negativne povratne sprege



114

Primeri primene negativne povratne sprege



115

Uticaj negativne povratne sprege

Da se podsetimo:

Kakav uticaj NPS ima na

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



06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

116

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**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

117

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



**Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

118

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.**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

119

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.**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

120

Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku



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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

121

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

122

Uticaj negativne povratne sprege

**Da se podsetimo:**

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



06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

123

„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.**

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

124

„Pozitivne“ osobine NPS



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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

125

“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.

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

126

“Negativne” osobine NPS



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

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

127



Šta smo naučili?

- **Fizičko značenje negativne i pozitivne povratne sprege sa stanovišta 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.
- Načini realizacije pojačavača sa negativnom povratnom spregom (blok šeme i nazivi).


06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

128

128





### Ispitna pitanja

1. Definicija funkcije povratne sprege.
2. Definicija kružnog pojačanja pojačavača sa povratnom spregom.
3. Objasniti uticaj NPS na osetljivost. (U odnosu na parametre pojačavača bez PS i parametre kola povratne sprege.)
4. Objasniti uticaj NPS na amplitudsku karakteristiku pojačavača.
5. Objasniti uticaj NPS na faznu karakteristiku pojačavača.
6. Objasniti uticaj NPS na nelinearna amplitudska izobličenja.
7. Objasniti uticaj NPS na šumove.
8. Osobine pojedinih načina realizacije pojačavača sa NPS sa stanovišta pojačanja, ulazne i izlazne otpornosti.
9. Uslov stabilnosti pojačavača iskazan preko polova prenosne funkcije.

129

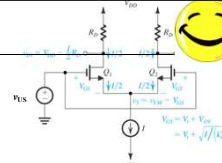
06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

129

### Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0,5V$ ,  $\mu_n C_{ox} W/L=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .  
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)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$   

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

Višestepeni pojačavači

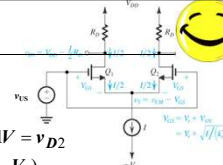
06. decembar 2018

Višestepeni pojačavači

E7.1 130

### Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0,5V$ ,  $\mu_n C_{ox} W/L=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .  
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)  $A_d = \left. \frac{-g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \right|_{r_o \rightarrow \infty} = -g_m R_D$   

$$g_m = \frac{2i_{D1}}{V_{GS1} - V_t} = \frac{I}{V_{GS1} - V_t} = \frac{0,4mA}{0,32V} = 1,25mA/V$$

$$A_d = -g_m R_D = 1,25mA/V \cdot 2,5k\Omega = -3,125V/V$$
  

$$A_c = \left. \frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D + 2(g_m r_o + 1)R_S} \right|_{r_o \rightarrow \infty, R_S \rightarrow \infty} = 0$$
  

$$CMRR = A_d / A_c \rightarrow \infty$$

Višestepeni pojačavači

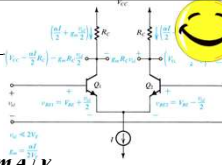
06. decembar 2018

Višestepeni pojačavači

E7.1 131

### 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  $R_C=10k\Omega$ .  $v_{BE}=5+0,005\sin(\omega t)V$   
 $v_{BE2}=5-0,005\sin(\omega t)V$ .



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

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

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

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

$$i_{C1} = 0,5 + 0,1\sin(\omega t) mA; \quad i_{C2} = 0,5 - 0,1\sin(\omega t) mA$$
- b)  $V_{C1} = V_{C2} = V_C = V_{CC} - R_C I_C = 15V - 10k\Omega \cdot 0,5mA = 10V$   

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

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

$$v_{C1} = V_C + v_{c1} = 10 - 1 \cdot \sin(\omega t) V; \quad v_{C2} = V_C + v_{c2} = 10 + 1 \cdot \sin(\omega t) V$$
- c)  $A_d = \left( \frac{v_{C1} - v_{C2}}{v_{ud}} \right) = -\frac{2}{0,01} = 200 V/V$

Višestepeni pojačavači

06. decembar 2018

Višestepeni pojačavači

E7.1 132

**Domaći 8.3 Rešenje:**

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

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

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

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

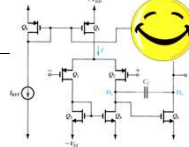
$$I_{D3} = I_{D1} = 45\mu A; \quad I_{D4} = I_{D2} = 45\mu A; \quad I_{D6} = I_{D7} = 90\mu A$$

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

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

(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> ( $\mu A$ )	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> (k $\Omega$ )	222	222	222	222	111	111	111	111



Za one koji žele da nauče više

**Domaći 8.3 Rešenje:**

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

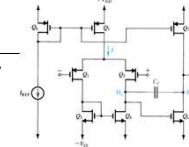
Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je  $I_{REF}=90\mu A$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=2.5V$ . Dopunite podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

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

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

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

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



06. decembar 2018

Višestepeni pojačavači

E7.1 134

Sledeće nedelje:

- Oscilatori – pozitivna povratna sprega

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

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

06. decembar 2018

Pojačavači sa povratnom spregom

135