Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

	U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kajanje)	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!

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

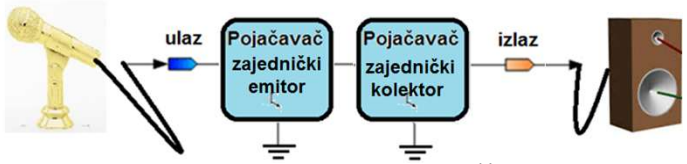
	U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kajanje)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2019.)	50%	20%
	120%	60%



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)

Da se podsetimo



Da li i kako mogu da se poboljšaju osobine?

Koje osobine?

- **izobličenja,**
- **stabilnost (ne)osetljivost**
- **Rul, Riz otpornost**
- **propusni opseg**

Pojačavači sa povratnom spregom (feedback)

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**

Da se podsetimo

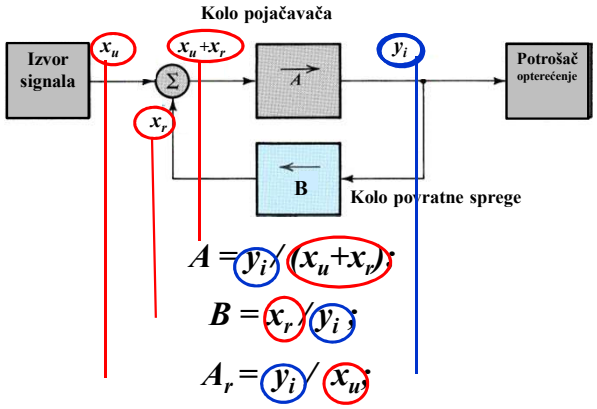
U opštem slučaju pojačavač signala (nezavisno od tipa) označićemo blokom u kome je upisano slovo A (*Amplifier*)



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

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

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

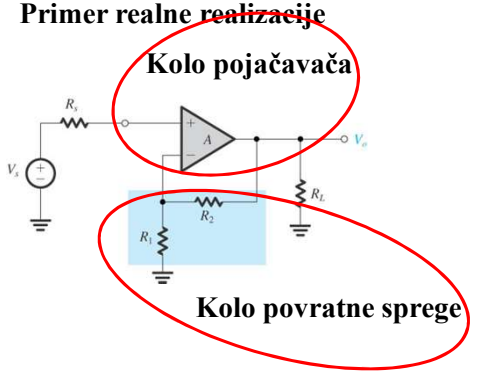


$$A = y_i / (x_u + x_r);$$

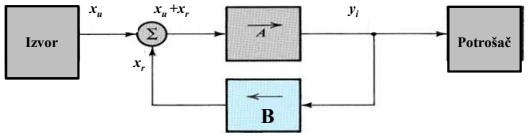
$$B = x_r / y_i;$$

$$A_r = y_i / x_u;$$

Primer realne realizacije



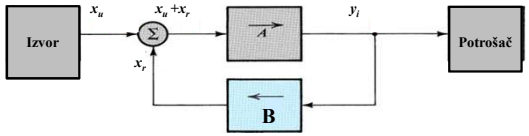
Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



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

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

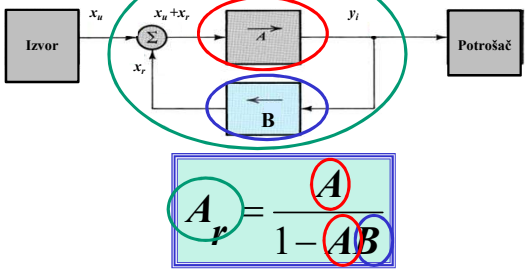
Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



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

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

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

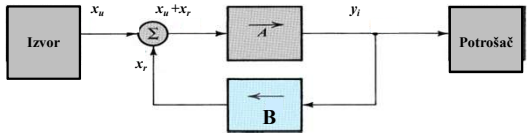


$$A_r=\frac{A}{1-AB}$$

Veza između:

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

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



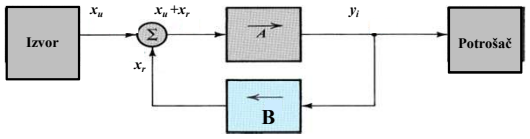
$$A_r=\frac{A}{1-AB}$$

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

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

Zavisi od frekvencije

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

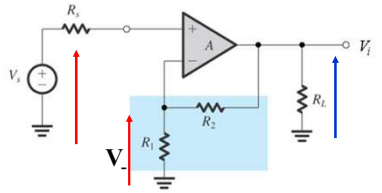


$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

za $AB>>1$ ⇨ $A_r = -\frac{1}{B}$

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

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



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*)**

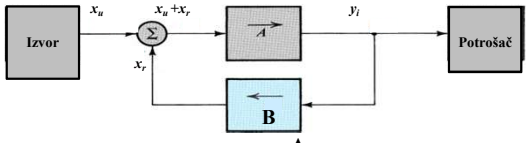
$$B = \frac{V_-}{V_o} = -\frac{R_1}{R_1+R_2} = -\frac{1k}{1k+9k} = -0.1$$

$$A_r = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1-AB} = \frac{10000}{1+10000\cdot 0{,}1} = \frac{10000}{1001} \approx 10$$

Uporediti sa pojačanjem neinvertorskog pojačavača!!!:

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

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

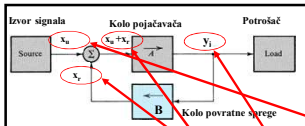


$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

|1-*AB*| < 1 ➡ $A_r > A$ **POZITIVNA**

|1-*AB*| > 1 ➡ $A_r < A$ **NEGATIVNA**

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



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

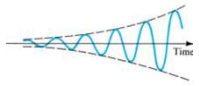
|1-AB| < 1 ➡ $A_r > A$ **POZITIVNA**

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



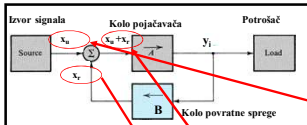
$$A_r = \frac{A}{1 - AB}$$

$|1\text{-}AB| < 1 \Rightarrow A_r > A$ **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)



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

$1\text{-}AB > 1 \Rightarrow A_r < A$ **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 sprege ne obrće fazu (otporno kolo) B>0, tada je neophodno da A < 0, odnosno da pojačavač obrće fazu.

(Zajednički emitor/sors)

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

$1\text{-}AB > 1 \Rightarrow A_r < A$ **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**

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

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,...**

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.

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=100mA/V, r_o=50k i R_D=5k, dobija se A=-454,5

Ako se ugradi komponente koje imaju toleranciju

10% sa vrednostima: g_m=90mA/V, r_o=45k i R_D=4k5

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

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

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

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

Promene vrednosti parametara tranzistora (μ, 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

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

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

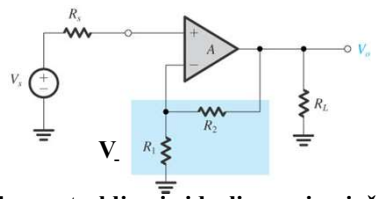


Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)



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=100dB. Odrediti:

a) R_2/R_1 tako da se dobije A_r=100!

b) B u dB?

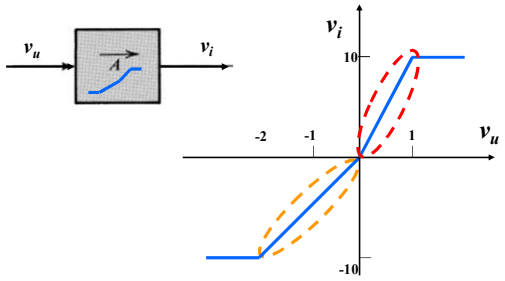
c) Napon na izlazu V_o, i V_- ukoliko je V_s=0.1V.

d) za koliko će se smanjiti A_r ukoliko pojačanje A opadne za 20%?

(Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)

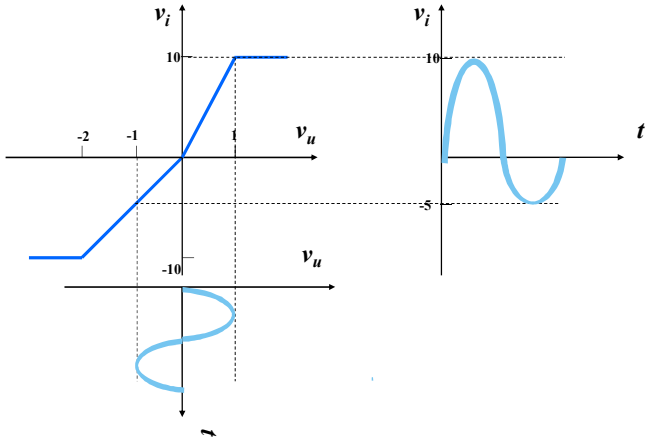
Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna amplitudska izobličenja

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

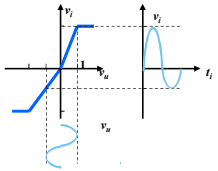


Nelinearna prenosna karakteristika sa slike prikazuje pojačanje u otvorenoj petlji (bez PS) od A=10 za $0<v_u<1$ i A=5 za $-2<v_u<0$.

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



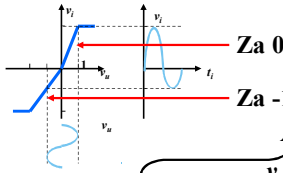
Uvođenjem NPS izobličenja mogu da se smanje.

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

(jer je za AB>>1 A_r=-1/B)

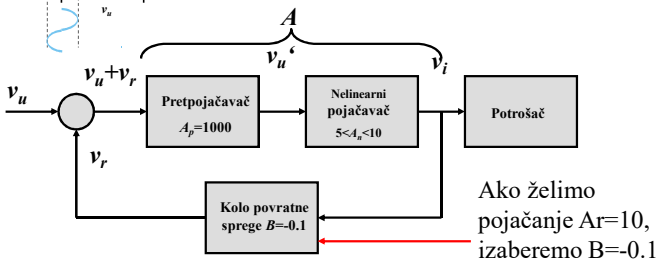
S obzirom da je u ovom slučaju 5<A<10, da bi AB>>1, treba nam kaskadna veza sa linearnim pojačavačem (bez izobličenja) koji ima veliko A. Zato ispred ovog pojačavača sa velikim nelinearnim izobličenjima (pojačavač velikih signala) upotrebimo linearni pojačavač sa A=1000:

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Za $0<v_i<10$, $A=A_pA_n$=10,000

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



Ako želimo pojačanje Ar=10, izaberemo B=-0.1

Uticaj negativne povratne sprege 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).

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege 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

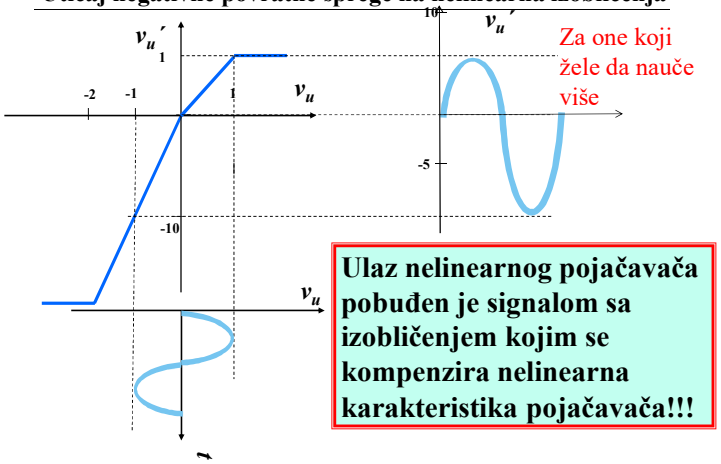
$$v_u' = A_1(v_u + v_r) = A_1(v_u + \frac{AB}{1-AB}v_u) = \frac{A_1}{(1-AB)}v_u$$

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

i

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

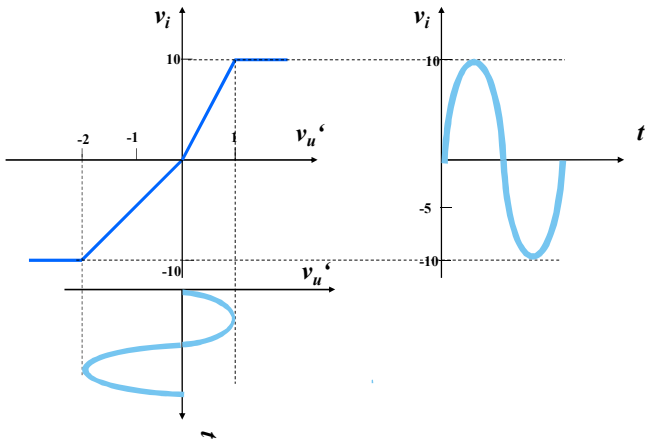
Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Ulaz nelinearnog pojačavača pobuđen je signalom sa izobličenjem kojim se kompenzira nelinearna karakteristika pojačavača!!!

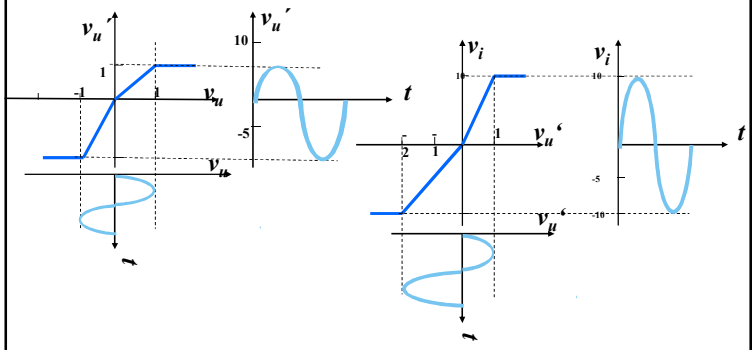
Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



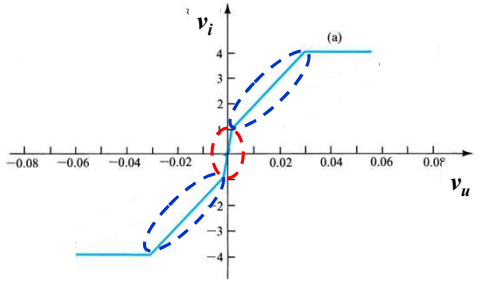
Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Za one koji žele da nauče više

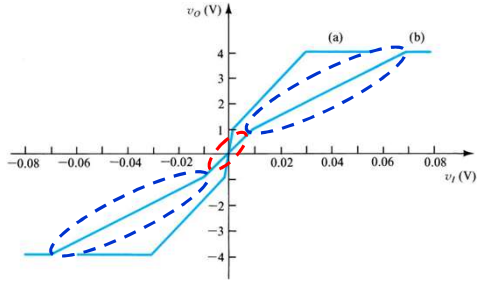
Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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.

Za one koji žele da nauče više

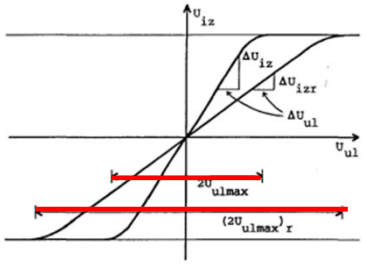
Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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.

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Sl. 6.1.2 Ilustracija uticaja negativne povratne sprege 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 .

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

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

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

Najčešće se ona primenjuje u poslednjem pojačavačkom stepenu.

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

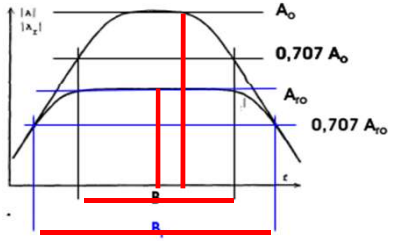
Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Promena amplitudske i fazne karakteristike direktno se odslikava 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 frekvencijsku karakteristiku



Efekat NPS ispoljava se kao da se "unutar" amplitudske karakteristike pojačavača bez PS ucrta karakteristika sa manjim pojačanjem.

Uočava se da će se propusni opseg povećati!.

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg?

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

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

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

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

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

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Propusni opseg pojačavača sa $f_v >> f_n$

$BW = f_v - f_n \approx f_v$,

odnosno za pojačavač sa PS

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

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.

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

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

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

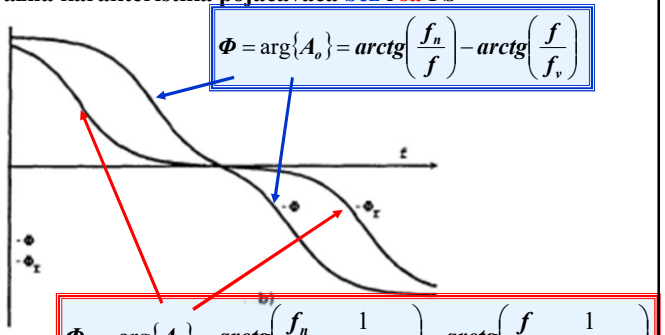
$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = arctg\left(\frac{f_{nr}}{f}\right) - arctg\left(\frac{f}{f_{vr}}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = arctg\left(\frac{1}{f}\frac{f_n}{(1 - A_0 B)}\right) - arctg\left(\frac{f}{f_v \cdot (1 - A_0 B)}\right)$$

$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = arctg\left(\frac{f_n}{f}\frac{1}{(1 - A_0 B)}\right) - arctg\left(\frac{f}{f_v}\frac{1}{(1 - A_0 B)}\right)$$

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

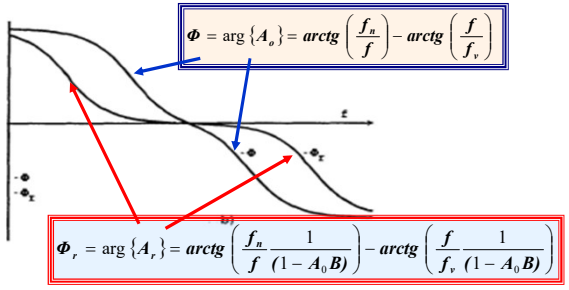
Fazna karakteristika pojačavača bez i sa PS



Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Kod kola sa PS

ispoljava se efekat nelinearnih faznih izobličenja.



Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

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

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

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

$$\Phi_{vr\varepsilon}\big|_{B=0} = arctg\left(f/f_v\right)$$

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijske karakteristike



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



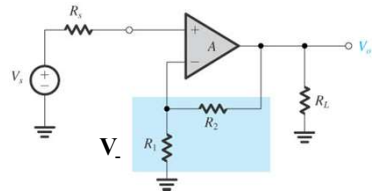
- **proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan (kod pojačavača sa $f_v >> f_n$)**



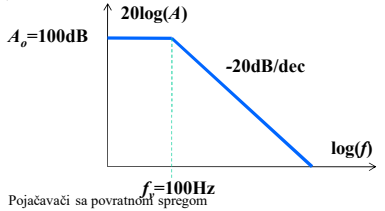
- **smanjuje pojačanje.**
- **povećava nelinearna fazna izobličenja.**

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

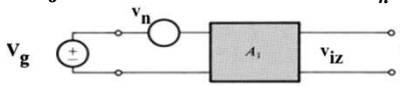


Uticaj negativne povratne sprege na šumove

Uticaj negativne povratne sprege na šumove

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

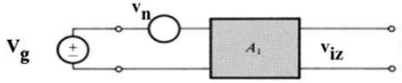
Pojačavač sa izvorom šuma v_n



Odnos signal-šum na ulazu:

$$S/Š = v_g/v_n$$

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



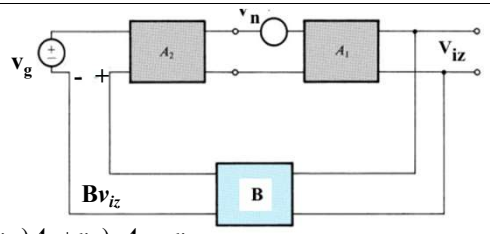
$$v_{iz} = A_1(v_g + v_n)$$

Odnos signal-šum na izlazu:

$$S/Š = (A_1 v_g)/(A_1 v_n) = v_g/v_n$$

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

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



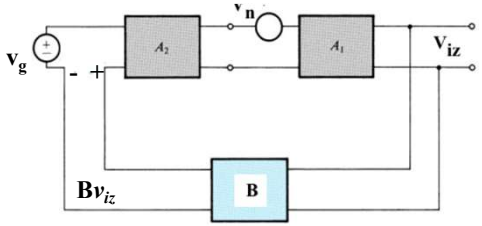
$$((v_g - Bv_{iz})A_2 + v_n)\cdot A_1 = v_{iz}$$

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

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

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

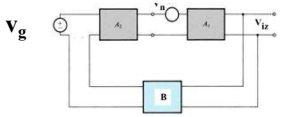
Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

odnos signal šum povećan je A_2 puta!

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!

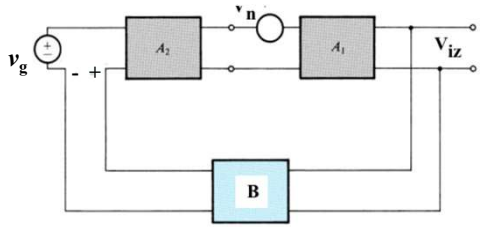
Veliko naponsko pojačanje ostvari se u pretpojačavaču sa velikim A_2, a primenom PS generisani šum na izlazu potisne se A_2 puta.

Uticaj negativne povratne sprege na šumove

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

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.

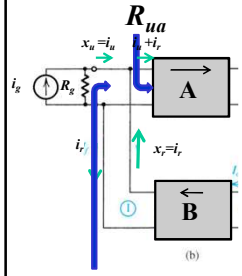


Načini realizacije pojačavača sa NPS

1. Tipovi realizacije NPS

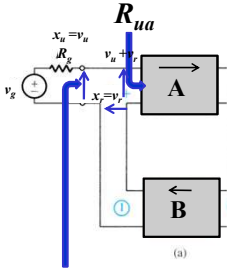
Priključivanje na ulazu:

Paraleno



$R_{ur} < R_{ua}$

Redno



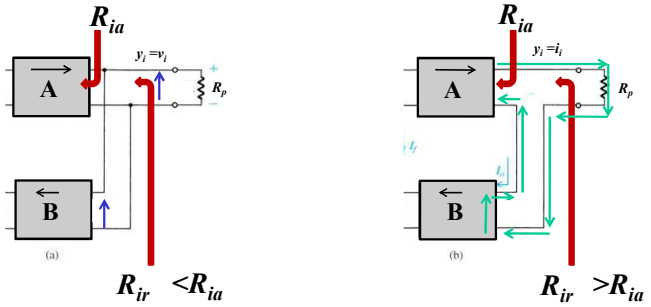
$R_{ur} > R_{ua}$

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

1. Tipovi realizacije NPS

Vraćeni signal sa izlaza proporcionalan je:

Naponu **ili** **Struji**



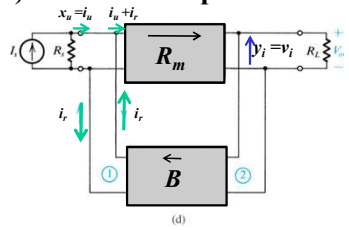
Kolo povratne sprege menja izlaznu otpornost (impedansu)!!!

1. Tipovi realizacije NPS

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

1. Tipovi realizacije NPS

a) Paralelno naponska



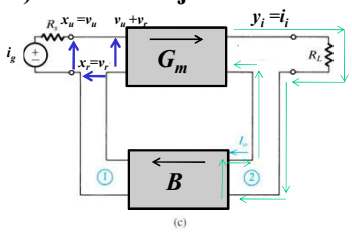
$$R_{mr} = \frac{v_i}{i_u} = \frac{R_m}{1 - R_m \cdot B}$$

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

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

1. Tipovi realizacije NPS

b) Redno strujna



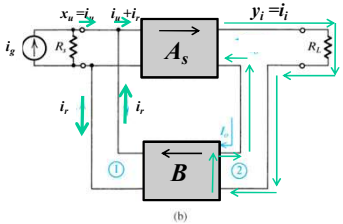
$$G_{mr} = \frac{i_i}{v_u} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot B}$$

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

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

1. Tipovi realizacije NPS

c) Paralelno strujna



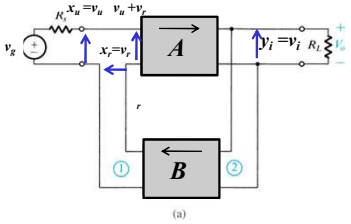
$$A_{sr} = \frac{i_i}{i_u} = \frac{A_s}{1 - A_s \cdot B}$$

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

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

1. Tipovi realizacije NPS

d) Redno naponska



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

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

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

Za one koji žele da nauče više

Projektovanje pojačavača sa NPS

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**

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!!!

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)**

Za one koji žele da nauče više

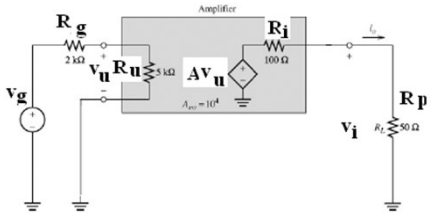
3. Analizirati kolo da bi se proverili projektni zahtevi

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

Za one koji žele da nauče više

Primer:

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



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.

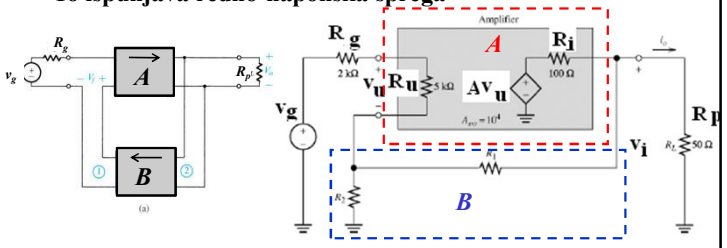
Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

1. Izbor tipa povratne sprege

Da bi odziv bio nezavisan od promena otprnosti 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



Moguće rešenje

Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

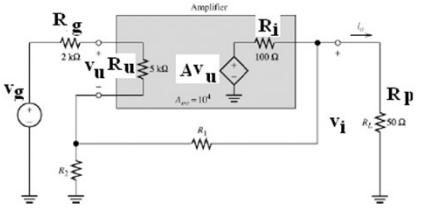
2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

Traži se A_r=10, a zna se da je A=10000. Ukoliko je ispunjeno AB>>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>>1.

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

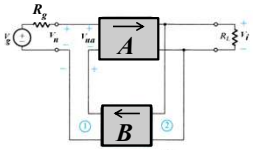
$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.1 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 9$$



Analiza pojačavača sa NPS

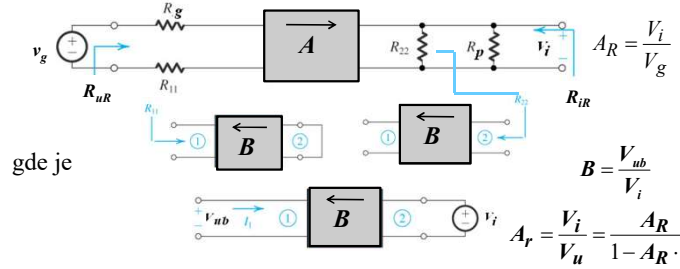
Za one koji žele da nauče više

Redno-naponska



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

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



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

gde je

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

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

Projektovanje pojačavača sa NPS

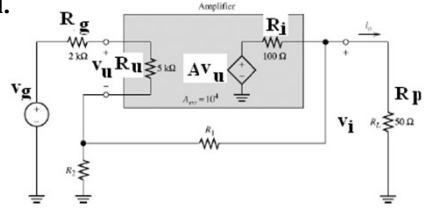
Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

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

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



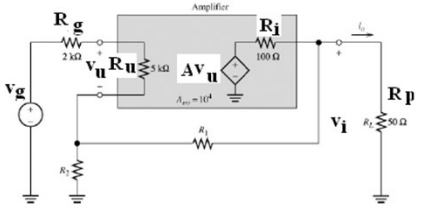
Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

Kompromisno rešenje je da R_2=500Ω<<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 499Ω, dok se R_1 realizuje kao redna veza otpornika od 4,32k i potenciometrom od 500Ω.

Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

3. Analiza

Sa izabranim vrednostima dobija se:

R_{11}=(0.5x4.5)/5=0.45kΩ

$R_{22}=R_1+R_2$=5kΩ

A_R=2237 (“A” uz uticaj R_{11} i R_{22})

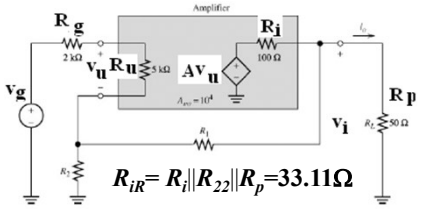
1-$B\,A_R$=225

A_r=9.94

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

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

R_{ur}'=1,67MΩ



$R_{iR}=R_i\|R_{22}\|R_p$=33.11Ω

$R_{ir}=[R_{iR}/(1-B\,A_R)]$=0.147Ω

$R_{ir}=R_{ir}'\,\|\,R_p$

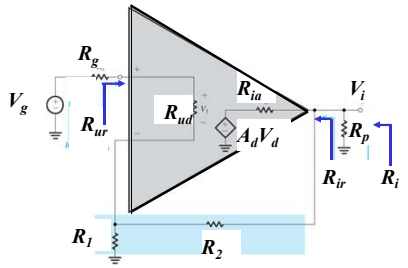
R_{ir}'=0,148Ω

Domaći 9.4:

Za one koji žele da nauče više



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



Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

U opštem slučaju pojačanje pojačavača sa povratnom spregom zavisi od frekvencije ω.

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

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

Na nekoj frekvenciji (ω_{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 i polova 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

$$s_{12} = \sigma \pm j\omega.$$

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

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

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

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

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

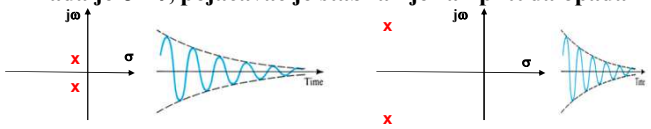
Da bi pojačavač bio stabilan, polovi moraju da budu u levoj poluravni, odnosno $\sigma<0$!

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

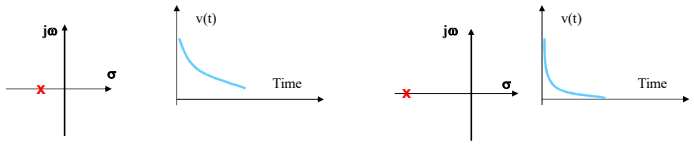
$$v(t) = 2e^{\sigma \cdot t}\cos(\omega \cdot t)$$

anvelopa

Kada je σ< 0, pojačavač je stabilan jer amplituda opada



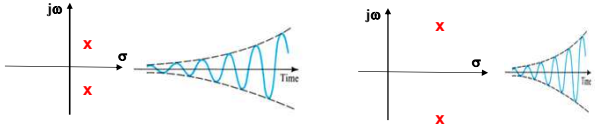
Kada je σ> >ω, oscilacije se priguše u intervalu manjem od 1/f



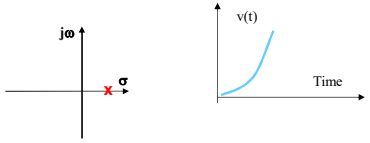
Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

Kada je σ> 0, pojačavač je nestabilan jer amplituda raste



Kada je ω=0, nema oscilacija ali signal raste



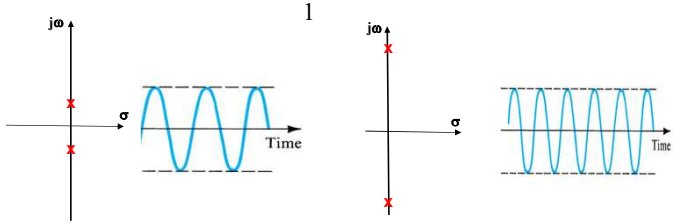
Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

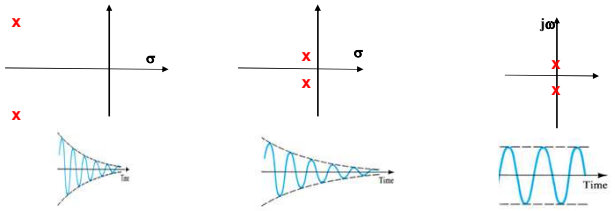
na granici stabilnosti σ=0

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

1



Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom



Očigledno je da će pojačavač biti stabilniji ukoliko su polovi udaljeni od jω ose.

U tom kontekstu treba sagledati uticaj NPS

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa jednim polom

$A(j\omega) = \dfrac{A_0}{(1 + j\omega/\omega_p)}$ Pojačanje u otvornoj petlji

Sa povratnom spregom

$$A_r(j\omega) = \frac{\dfrac{A_0}{(1 + j\omega/\omega_p)}}{1 - \dfrac{A_0 B}{(1 + j\omega/\omega_p)}} = \frac{\dfrac{A_0}{(1 + j\omega/\omega_p)}}{\dfrac{1 + j\omega/\omega_p - A_0 B}{(1 + j\omega/\omega_p)}} = \frac{\dfrac{A_0}{(1 - A_0 B)}}{\dfrac{1 + j\omega/\omega_p - A_0 B}{(1 - A_0 B)}} = \frac{A_{r0}}{1 + \dfrac{j\omega/\omega_p}{(1 - A_0 B)}}$$

$$A_r(j\omega) = \frac{A_{r0}}{1 + \dfrac{j\omega}{\omega_p(1 - A_0 B)}} = \frac{A_{r0}}{1 + j\omega/\omega_{pr}} \Rightarrow \boxed{\omega_{pr} = \omega_p(1 - A_0 B)}$$

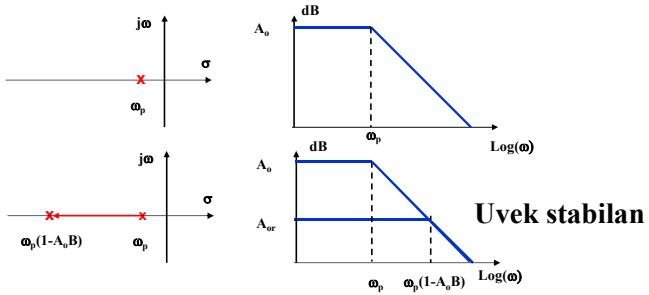
Uvođenje NPS pomera pol od jω ose za (1-A_oB) puta.

Zato je pojačavač stabilniji!

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa jednim polom

Kada A_oB raste od 0 do ∞ , ω_{pr} menja se od ω_p ka - ∞, a NF pojačanje se smanjuje:



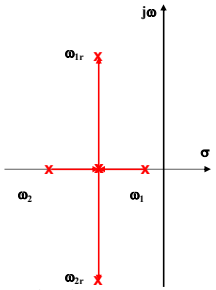
Uvek stabilan

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Praktično, pojačavači imaju više od jednog pola.

Pol koji je bliži jω osi naziva se dominantni pol.

Teži se da se projektuje pojačavač kod koga je dominantni pol što dalje od jω ose.



Pojačavač sa dva pola.

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

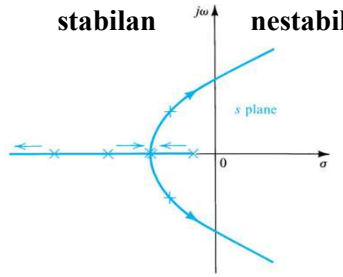
$$A_r = \frac{A(s)}{(1 + A(s)B)}$$

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

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa tri pola

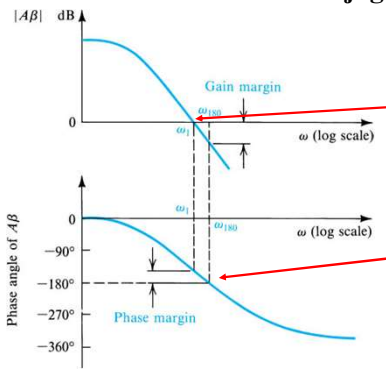
stabilan **nestabilan**



Uslovno stabilan

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Kriterijum stabilnosti preko frekvencijskih karakteristika - bodeovih dijagrama

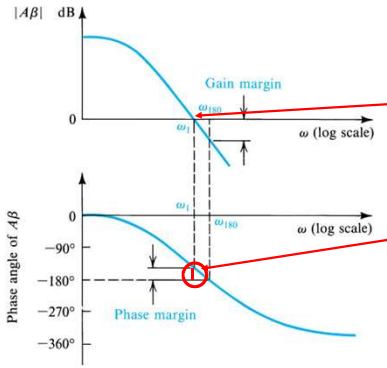


Granica uslova stabilnosti je $AB = 1$, $20\log(AB)=0$

Da bi bio nestabilan potrebno je i da signal promeni fazu za 180º.

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

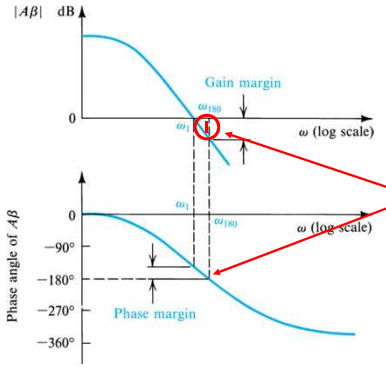
Kriterijum stabilnosti preko bodeovih dijagrama



"Zaliha" u fazi, do 180º, koju pojačavač ispoljava na frekvenciji pri kojoj je $AB = 1$, odnosno $20\log(AB)=0$, zove se *margina faze*.

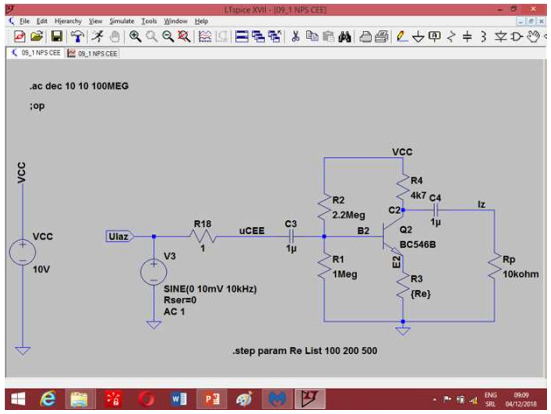
Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Kriterijum stabilnosti preko bodeovih dijagrama

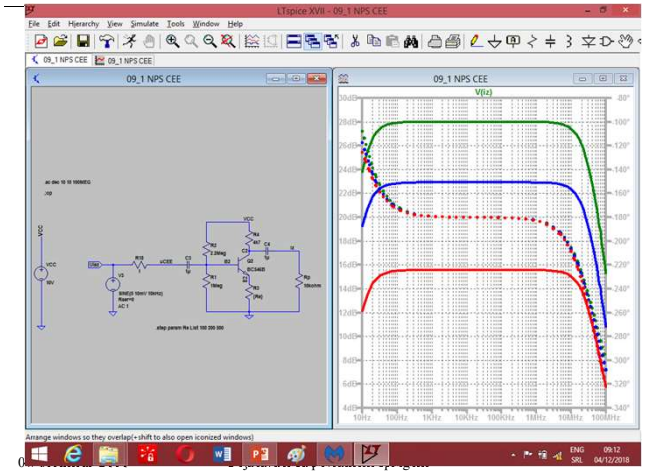


"Zaliha" u pojačanju koju pojačavač ispoljava na frekvenciji pri kojoj je faza= 180º. Naziva se *margina pojačanja*

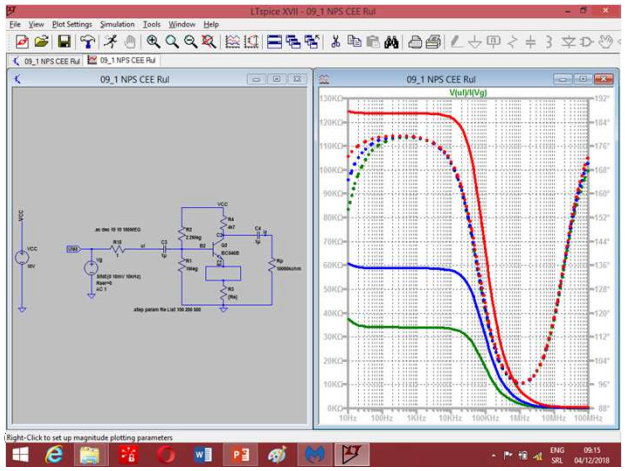
Primeri primene negativne povratne sprege



Primeri primene negativne povratne sprege



Primeri primene negativne povratne sprege



Uticaj negativne povratne sprege

Da se podsetimo:

Kakav uticaj NPS ima na

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



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

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



Negativna povratna sprega utiče na proširenje propusnog opsega pojačavača.

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

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



Proizvod pojačanja i propusnog opsega je konstantan (kod pojačavača sa $f_v >> f_n$)

Negativna povratna sprega smanjuje pojačanje.

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

Uticaj negativne povratne sprege

Da se podsetimo:

- **„Pozitvne“ osobine NPS?**
- **„Neutralne“ osobine NPS**
- **„Negativne“ osobine NPS**



„Pozitvne“ 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.**

„Pozitvne“ osobine NPS



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

"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 $f_v >> f_n$).**
- **Negativna povratna sprega smanjuje pojačanje.**

"Negativne" osobine NPS



Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.



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).**

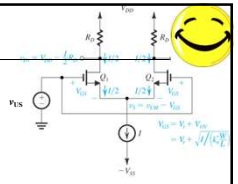


Ispitna pitanja

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.**

Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa V_t=0.5V, $\mu_n C_{ox}$'W/L=2A=4mA/V², λ=0.
Poznato je I=0.4mA, V_{DD}=V_{SS}=1.5V i R_D=2.5kΩ.



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

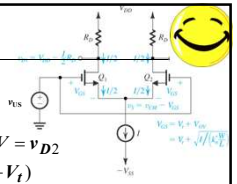
$v_S = v_{US} - V_{GS1} = -0{,}2V - 0{,}82V = -1{,}02V$

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

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

Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa V_t=0.5V, $\mu_n C_{ox}$'W/L=2A=4mA/V², λ=0.
Poznato je I=0.4mA, V_{DD}=V_{SS}=1.5V i R_D=2.5kΩ.



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) $$A_d = -\left.\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D}\right|_{r_O \to \infty} = -g_m R_D$$

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

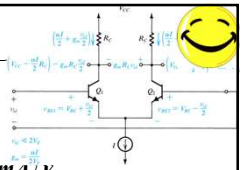
$A_d = -g_m R_D = 1{,}25mA/V \cdot 2{,}5k\Omega = -3{,}125V/V$

$$A_c = -\left.\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D + 2(g_m r_o + 1)R_S}\right|_{\substack{r_O \to \infty \\ R_S \to \infty}} = 0$$

$CMRR = A_d / A_c \to \infty$

Domaći 8.2 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa α=1, V_{BE}=0.7V.
Poznato je I=1mA, V_{CC}=15V i R_C=10kΩ, v_{BE1}=5+0.005sin(ωt)V
v_{BE2}=5-0.005sin(ωt) V.



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

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

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

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

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

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

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

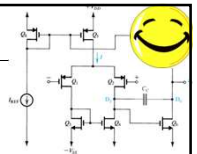
$v_{c2} = -R_C i_{c2} = +1\sin(\omega t)\ V$

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

c) $$A_d = \left(\frac{v_{C1} - v_{C2}}{v_{du}}\right) = -\frac{2}{0.01} = 200\ \text{V/V}$$

Domaći 8.3 Rešenje:

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa $\mu_n C_{ox}$=160μA/V², V_{tn}=0.7V, $\mu_p C_{ox}$=40μA/V², V_{tp}=-0.8V, V_{An}= -V_{Ap}=-10V.
Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je I_{REF}=90μA, V_{DD}=V_{SS}=2.5V. Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.



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

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

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

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

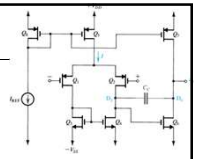
$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)};\quad r_o = \frac{V_A}{I_D},$$ Zamenom vrednosti za svaki tranzistor (Q1, Q2, Q5, Q7 i Q8 pMOS), (Q3, Q4, i Q6 nMOS)

Za one koji žele da nauče više

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8
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_D(μA)	45	45	45	45	90	90	90	90
V_{GS}(V)	1.1	1.1	1.	1.	1.1	1	1.1	1.1
g_m(mA/V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
r_o(kΩ)	222	222	222	222	111	111	111	111

Domaći 8.3 Rešenje:

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa $\mu_n C_{ox}$=160μA/V², V_{tn}=0.7V, $\mu_p C_{ox}$=40μA/V², V_{tp}=-0.8V, V_{An}= -V_{Ap}=-10V.
Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je I_{REF}=90μA, V_{DD}=V_{SS}=2.5V. Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.



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

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

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

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

E7.1

Sledeće nedelje:

- Oscilatori – pozitivna povratna sprega

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

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu