


Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

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

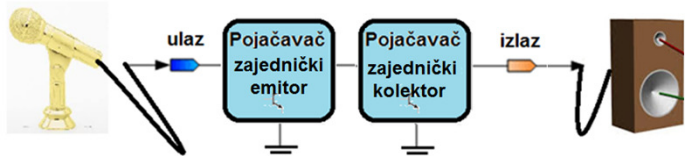


Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

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

05. decembar 2017. 1

Da se podsetimo



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


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

05. decembar 2017. Višestepeni pojačavači 3

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

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



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

05. decembar 2017. 2

Pojačavači sa povratnom spregom

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 4

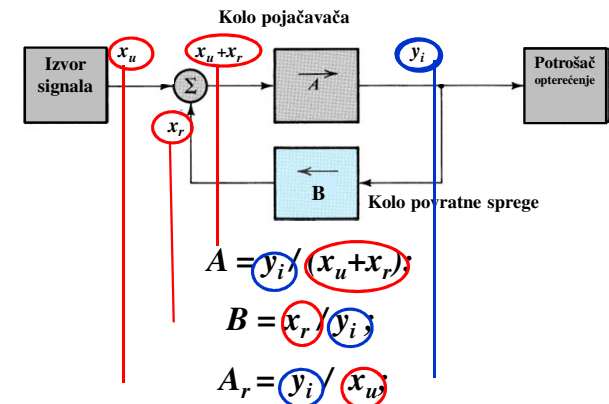
1. Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom
 1. Tipovi sprege
2. Osobine negativne povratne sprege
 1. Uticaj na pojačanje pojačavača
 2. Uticaj na osetljivost pojačavača
 3. Uticaj na nelinearna izobličenja
 4. Uticaj na propusni opseg pojačavača
 5. Uticaj na šumove
3. Načini realizacije pojačavača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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

5

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



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

$$B = x_r / y_i$$

$$A_r = y_i / x_u$$

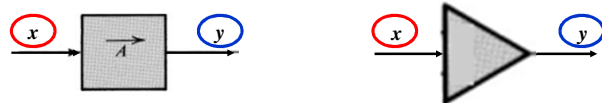
05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

7

Da se podsetimo

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



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

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

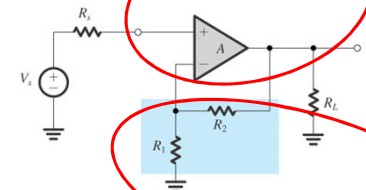
05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

6

Primer realne realizacije

Kolo pojačavača



Kolo povratne sprege

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

8

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 9

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 11

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 10

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

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

Zavisi od frekvencije

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 12

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 13

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 15

Primer:

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

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

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

Uporediti sa pojačanjem neinvertorskog pojačavača!!!:

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 14

Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

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

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

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

Iako pojačanje raste ovo NIJE DOBRO jer pojačavač postaje nestabilan.

izlazni signal stalno raste

05. decembar 2017. 15

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

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


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





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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 17

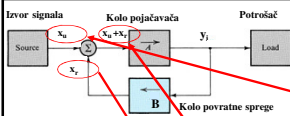
$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

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

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 19



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

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

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

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

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

(Zajednički emitor/sors)

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 18

Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 20

Uticaj negativne povratne sprega 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,...

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

21

Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača

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

Pojačanje pojačavača sa zajedničkim sorsom (MOSFET) iznosi

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

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

Ako se ugradi komponente koje imaju toleranciju

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

23

Uticaj negativne povratne sprega 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.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

22

Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača

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

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

Promene vrednosti parametara tranzistora (μ , g_m , r_o) i elemenata kola (R_C ; R_D) utiču na promenu pojačanja bez povratne sprega.

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

24

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:

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

25

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

27

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.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

26

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

$98 < A_r < 102$

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

28

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

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

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

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

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

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

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

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

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

relativni koeficijent osetljivosti je

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

odnosno

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

Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

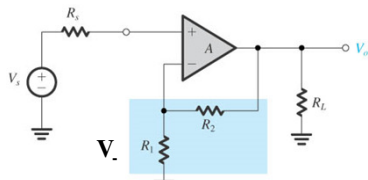


Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)



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

Domaći 9.1:



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

Odrediti:

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

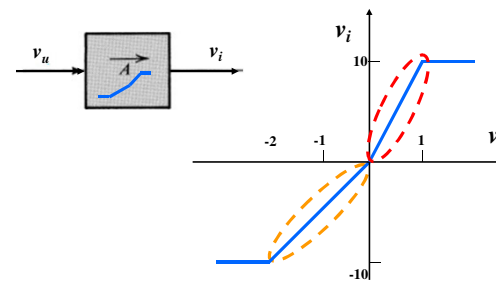
(Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

33

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

35

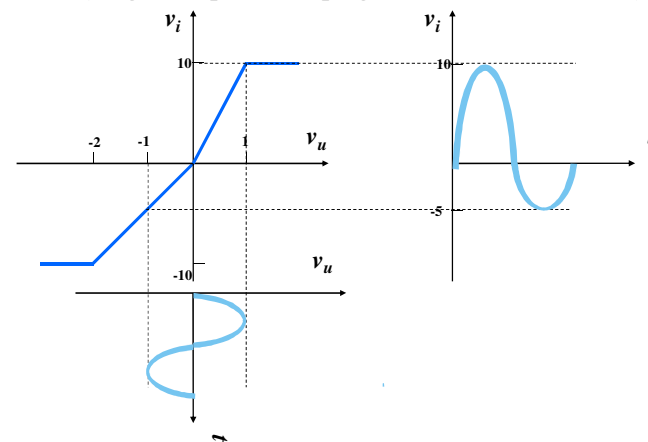
Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna amplitudska izobličenja

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

34

Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

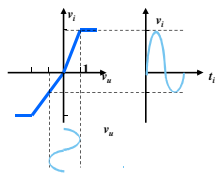


05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

36

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



Uvođenjem NPS izobličenja mogu da se smanje.

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

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

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

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja

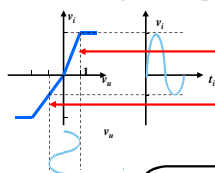
Sada je za $0 < v_i < 10, A_r = 9.99$ i $A_r = \frac{A}{1-AB}$
 za $-10 < v_i < 0, A_r = 9.98$ $A_r = \frac{A}{1-AB}$

Pojačanje je približno isto za obe poluperiode!!

Smanjuju se nelinearna amplitudska izobličenja!!!

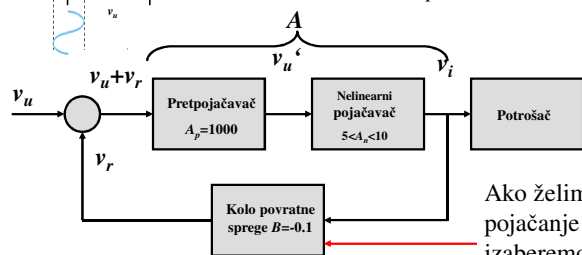
Važi za *aktivni radni režim* izlaznog pojačavača – (u opsegu u kome izlazni pojačavač nije u zasićenju).

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



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

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



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

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja

Objašnjenje:

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

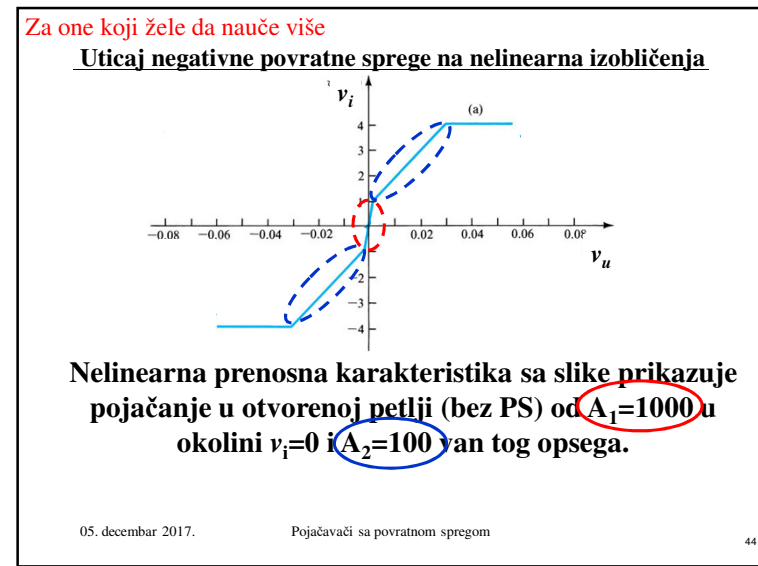
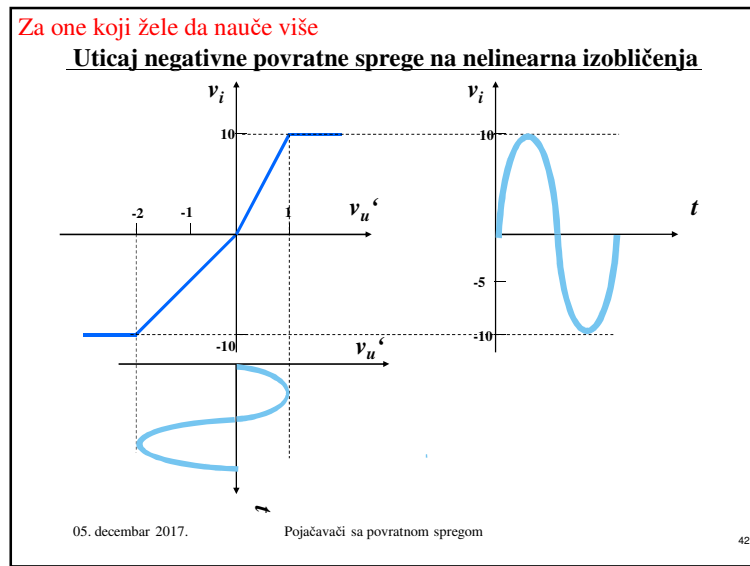
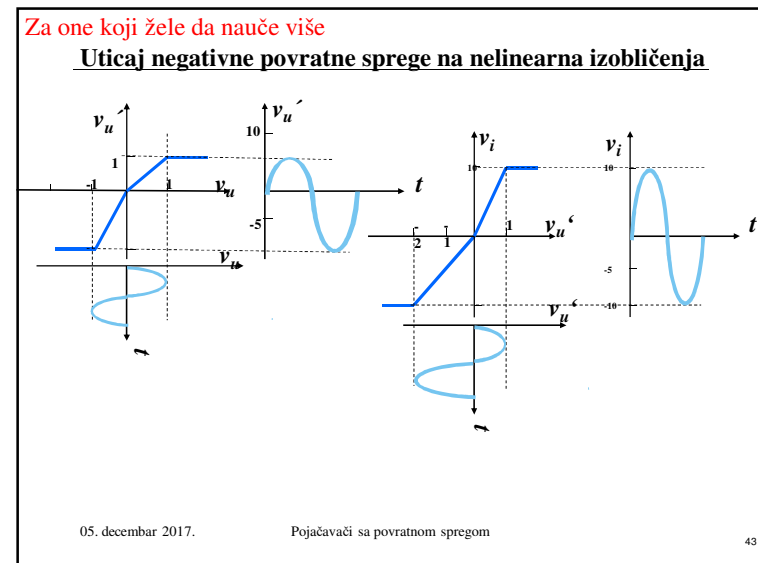
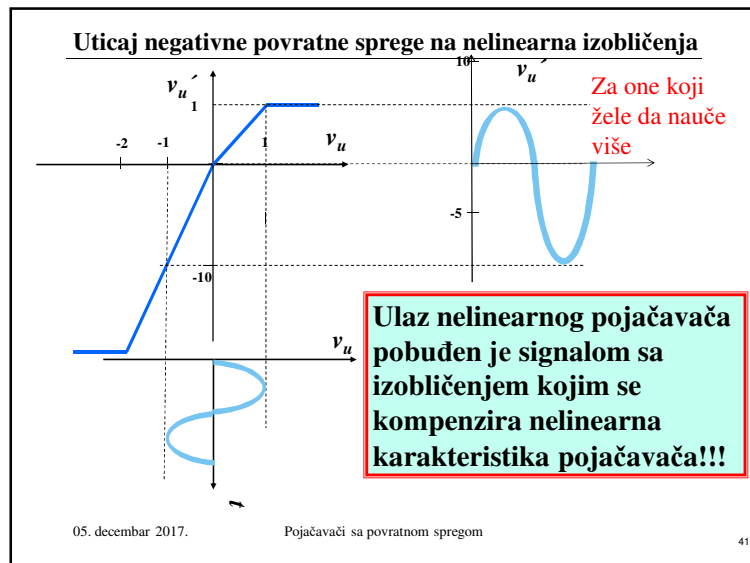
dobija se

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

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

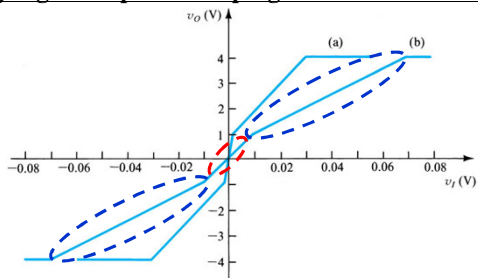
i

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



Za one koji žele da nauče više

Uticaј negativne povratne sprega 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.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

45

Uticaј negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja

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

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

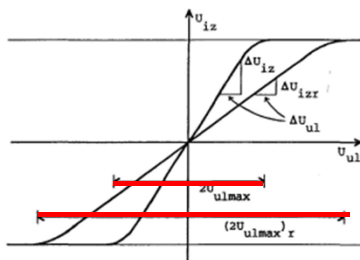
Najčešće se ona primenjuje u poslednjem pojačavačkom stepenu.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

47

Uticaј negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



Sl. 6.1.2 Ilustracija uticaja negativne povratne sprega 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.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

46

Uticaј negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

48

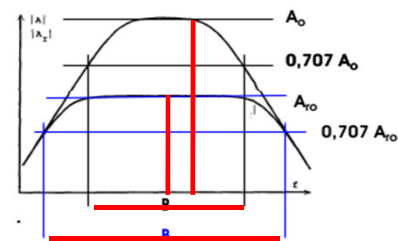
Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

49

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



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

Uočava se da će se propusni opseg povećati!.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

51

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

50

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg?

Na niskim,

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

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

srednjim

$$A_o$$

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

visokim f

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

52

Za one koji žele da nauče više

Uticaj negativne povratne sprega na frekencijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg pri niskim f ?

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

53

Uticaj negativne povratne sprega na frekencijsku karakteristiku

Propusni opseg pojačavača sa $f_v \gg f_n$

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

odnosno za pojačavač sa PS

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

55

Uticaj negativne povratne sprega na frekencijsku karakteristiku

Za koliko se poveća propusni opseg pri visokim f ?

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

54

Uticaj negativne povratne sprega na frekencijsku 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 sprega!

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

56

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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

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

Fazna karakteristika definisana je sa

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 57

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Fazna karakteristika pojačavača bez i sa PS

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 59

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

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

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 58

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

Kod kola sa PS

ispoljava se efekat nelinearnih faznih izobličenja.

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 60

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne sprega na frekventijsku karakteristiku

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

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

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

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

61

Uticao negativne povratne sprega na frekventijsku karakteristiku



- 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.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

63

Za one koji žele da nauče više

Uticao negativne povratne sprega na frekventijsku karakteristiku

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

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

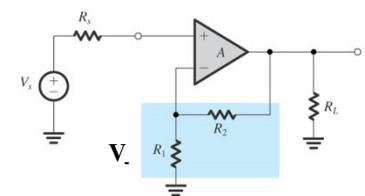
$$\Phi_{vr\epsilon} |_{B=0} = \text{arctg} (f/f_v)$$

05. decembar 2017.

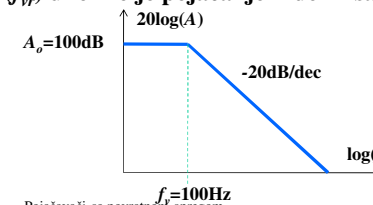
Pojačavači sa povratnom spregom

62

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



05. decembar 2017.

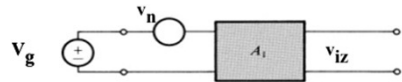
Pojačavači sa povratnom spregom

64

**Uticaj negativne povratne sprega
na šumove**

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 65

Uticaj negativne povratne sprega na šumove



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

Odnos signal-šum na izlazu:

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

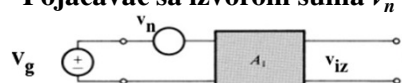
**I signal i šum pojačaće se A_1 puta, tako da
odnos signal šum ostaje konstantan**

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 67

Uticaj negativne povratne sprega na šumove

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

Pojačavač sa izvorom šuma v_n

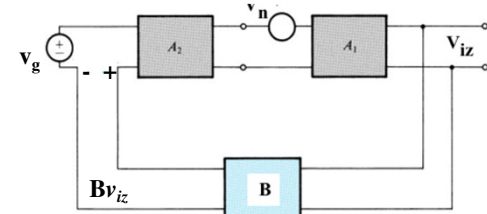


Odnos signal-šum na ulazu:

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 66

Uticaj negativne povratne sprega na šumove



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

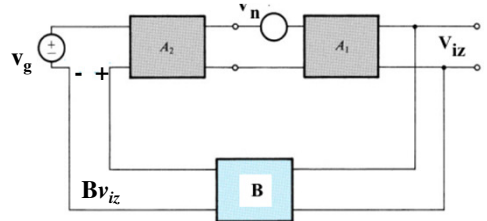
$$A_1 \cdot A_2 \cdot v_g - B \cdot A_1 \cdot A_2 v_{iz} + A_1 \cdot v_n = v_{iz}$$

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

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 68

Uticaj negativne povratne sprege na šumove




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

odnos signal šum povećan je A_2 puta! 😊

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 69

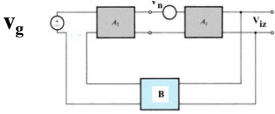
Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 71

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

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

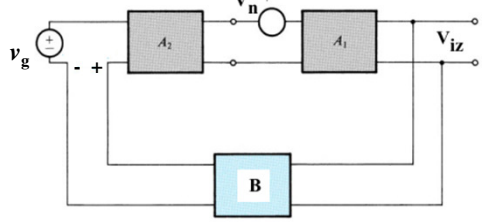
Veliko naponsko pojačanje ostvari se u pretpojačavaču sa velikim A_2 , a primenom PS generisani šum na izlazu potisne se A_2 puta.

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 70

Domaći 9.3: 🤔

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

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



05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 72

Načini realizacije pojačavača sa NPS

05. decembar 2017. 73

1. Tipovi realizacije NPS

Vraćeni signal sa izlaza proporcionalan je:

Naponu

$R_{ir} < R_{ia}$

ili

Struji

$R_{ir} > R_{ia}$

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 75

1. Tipovi realizacije NPS

Priključivanje na ulazu:

Paraleno

$R_{ur} < R_{ua}$

Redno

$R_{ur} > R_{ua}$

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 74

1. Tipovi realizacije NPS

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 76

1. Tipovi realizacije NPS

a) Paralelno naponska

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

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

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

(d)

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 77

1. Tipovi realizacije NPS

c) Paralelno strujna

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

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

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

(b)

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 79

1. Tipovi realizacije NPS

b) Redno strujna

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

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

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

(c)

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 78

1. Tipovi realizacije NPS

d) Redno naponska

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

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

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

(a)

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 80

Za one koji žele da nauče više

Projektovanje pojačavača sa NPS

81

Projektovanje pojačavača sa NPS

1. Izabrati odgovarajući tip PS.

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

*Izrazi važe za idealne pojačavače;

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

05. decembar 2017.

Povratna sprega

83

Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

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

05. decembar 2017.

Povratna sprega

82

Projektovanje pojačavača sa NPS

Za one koji žele da nauče više

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

Pravila:

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

05. decembar 2017.

Povratna sprega

84

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

3. Analizirati kolo da bi se proverili projektni zahtevi

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 85

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Primer:

Zahtevi:

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 87

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Primer:

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 86

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

1. Izbor tipa povratne sprega

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

To ispunjava redno-naponska sprega

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

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

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

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 89

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 91

Analiza pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Redno-naponska

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

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

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

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

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

gde je

05. decembar 2017. Povratna sprega 90

Projektovanje pojačavača sa NPS Za one koji žele da nauče više

Rešenje:

2. Određivanje vrednosti otpornosti u kolu PS

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 92

Za one koji žele da nauče više

Projektovanje pojačavača sa NPS

Rešenje:

3. Analiza

Sa izabranim vrednostima dobija se

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

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

$A_R = 2237$

$1 - B A_R = 225$

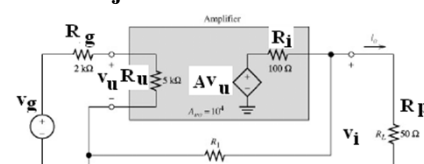
$A_r = 9.94$

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 93



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

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

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

$R_{ir}' = 0.148 \Omega$

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

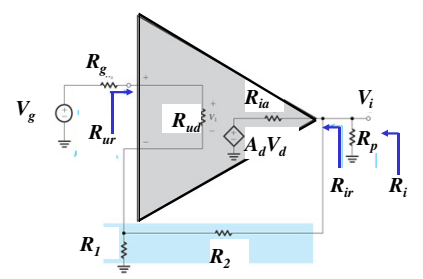
05. decembar 2017. Povratna sprega 95


Za one koji žele da nauče više

Domaći 9.4:

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 94





Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

Čim 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.

05. decembar 2017. Povratna sprega 96

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Od čega zavisi i kako odrediti stabilnost pojačavača?

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 97

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Razmotrimo pojačavač koji ima par polova definisanih sa

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

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 99

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 98

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 100

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 101

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 103

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 102

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

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

U tom kontekstu treba sagledati uticaj NPS

05. decembar 2017. Povratna sprega 104

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa jednim polom

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

Sa povratnom spregom

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

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

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

Zato je pojačavač stabilniji!

05. decembar 2017. Povratna sprega 105

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Praktično, pojačavači imaju više od jednog pola.

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

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

Pojačavač sa dva pola.

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

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

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

05. decembar 2017. Povratna sprega 107

Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa jednim polom

Kada $A_0 B$ raste od 0 do ∞ , ω_{pr} menja se od ω_p ka $-\infty$, a NF pojačanje se smanjuje:

Uvek stabilan

05. decembar 2017. Povratna sprega 106

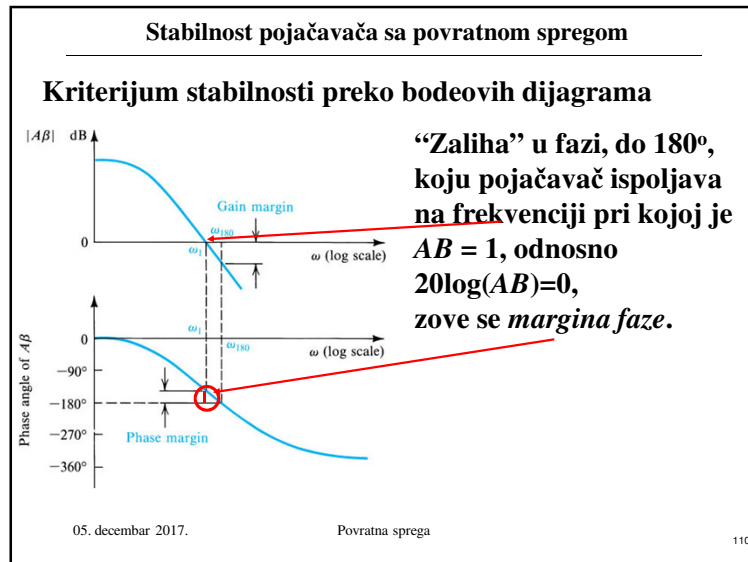
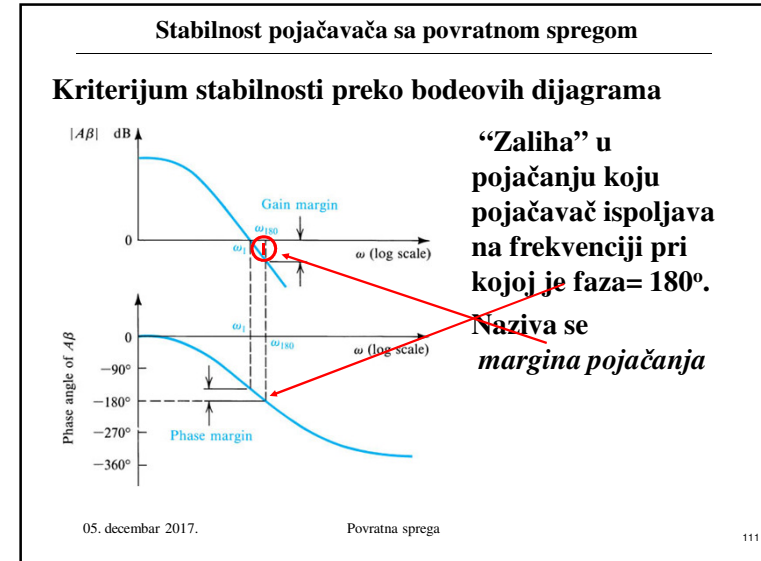
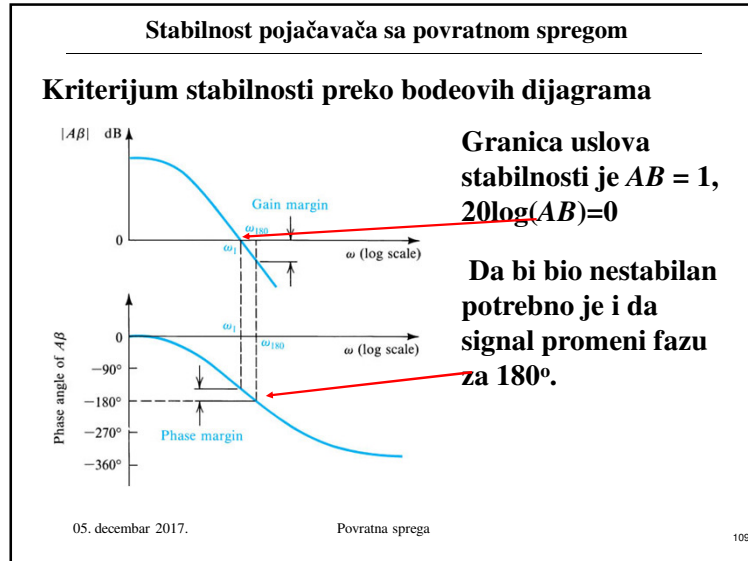
Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

Pojačavač sa tri pola

stabilan nestabilan

Uslovno stabilan

05. decembar 2017. Povratna sprega 108



Uticaj negativne povratne spregne

Da se podsetimo:

Kakav uticaj NPS ima na

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

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 112

Uticaj negativne povratne sprega na osetljivost pojačavača



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



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

113

Uticaj negativne povratne sprega na frekvencijsku karakteristiku



Negativna povratna sprega utiče na proširenje propusnog opsega pojačavača.

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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

115

Uticaj negativne povratne sprega na nelinearna izobličenja



Negativna povratna sprega smanjuje nelinearna amplitudska izobličenja

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

114

Uticaj negativne povratne sprega na frekvencijsku karakteristiku



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

Negativna povratna sprega smanjuje pojačanje.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

116

Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku



Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

117

Uticaj negativne povratne sprege

Da se podsetimo:

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



05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

119

Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

118

„Pozitivne“ osobine NPS



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

120

„Pozitivne“ osobine NPS



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

121

“Negativne” osobine NPS



Negativna povratna sprega povećava nelinearna fazna izobličenja.

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

123

“Neutralne” osobine NPS



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

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

122

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).

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

124

124

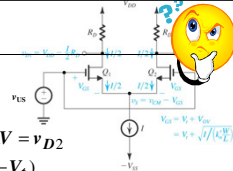
Ispitna pitanja

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.

05. decembar 2017. Pojačavači sa povratnom spregom 125 125

Domaći 8.1 Rešenje:

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



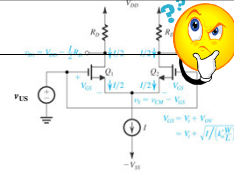
d) za $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$; $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$; $v_{D1} = 1V = v_{D2}$
 $V_{DS\ min} = V_{GS1} - V_t = v_{D1} - v_{S\ max} \Rightarrow v_{S\ max} = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t)$
 $v_{S\ max} = v_{US\ max} - V_{GS1} \Rightarrow v_{US\ max} = v_{S\ max} + V_{GS1} = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t)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

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

05. decembar 2017. Višestepeni pojačavači E7.1 127

Domaći 8.1 Rešenje:

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



a) $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$
 $i_{D1} = A(V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS1} = V_t + \sqrt{\frac{i_{D1}}{A}} = 0,5V + \sqrt{\frac{0,2}{2}}V = 0,82V = V_{GS2}$
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0 - 0,82 = -0,82V$
 $v_{D1} = V_{DD} - R_D i_{D1} = 1,5V - 2,5k \cdot 0,2mA = 1V = v_{D2}$

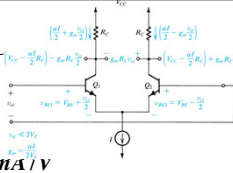
b) kao pod a) $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$; $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$; $v_{D1} = 1V = v_{D2}$
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = -0,2V - 0,82V = -1,02V$

c) kao pod a) $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$; $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$; $v_{D1} = 1V = v_{D2}$
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0,9V - 0,82V = +0,08V$

05. decembar 2017. Višestepeni pojačavači E7.1 126

Domaći 8.2 Rešenje:

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



a) za $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \alpha \cdot I/2 = 0,5mA$;
 $g_{m1} = g_{m2} = g_m = I_C / V_T = 0,5mA / 0,025V = 20mA/V$
 $v_{ud} = v_{BE1} - v_{BE2} = 0,01\sin(\omega t)V$
 $i_{c1} = g_m (v_{ud} / 2) = 0,1\sin(\omega t)mA$; $i_{c2} = -g_m (v_{ud} / 2) = -0,1\sin(\omega t)mA$
 $i_{C1} = 0,5 + 0,1\sin(\omega t)mA$; $i_{C2} = 0,5 - 0,1\sin(\omega t)mA$

b) $V_{C1} = V_{C2} = V_C = V_{CC} - R_C I_C = 15V - 10k\Omega \cdot 0,5mA = 10V$
 $v_{c1} = -R_C i_{c1} = -1\sin(\omega t)V$
 $v_{c2} = -R_C i_{c2} = +1\sin(\omega t)V$
 $v_{C1} = V_C + v_{c1} = 10 - 1 \cdot \sin(\omega t)V$; $v_{C2} = V_C + v_{c2} = 10 + 1 \cdot \sin(\omega t)V$

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

05. decembar 2017. Višestepeni pojačavači E7.1 128

Domaći 8.3 Rešenje:

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

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

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

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

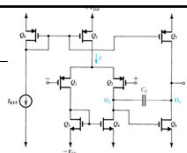
$$I_{D3} = I_{D1} = 45\mu A; \quad I_{D4} = I_{D2} = 45\mu A; \quad I_{D6} = I_{D7} = 90\mu A$$

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

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

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

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
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
$I_D(\mu A)$	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
$r_o(k\Omega)$	222	222	222	222	111	111	111	111



Za one koji žele da nauče više

Sledeće nedelje:

- Oscilatori – pozitivna povratna sprega

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

> EDUCATION > OSNOVI ELEKTRONIKE

slajdovi u pdf formatu

05. decembar 2017.

Pojačavači sa povratnom spregom

131

Domaći 8.3 Rešenje:

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

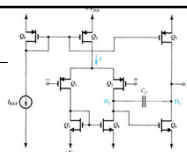
Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je $I_{REF}=90\mu A$, $V_{DD}=V_{SS}=2.5V$. Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

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

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

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

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



05. decembar 2017.

Višestepeni pojačavači

E7.1 130