

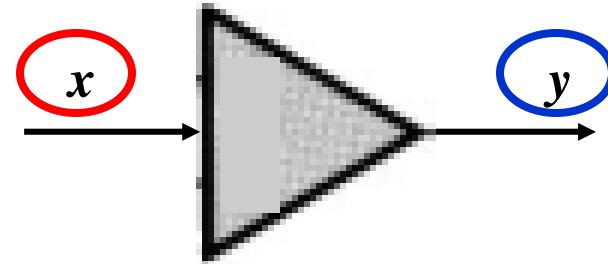
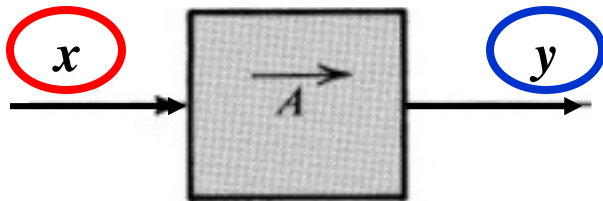
Pojačavači sa negativnom  
povratnom spregom

- 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

---

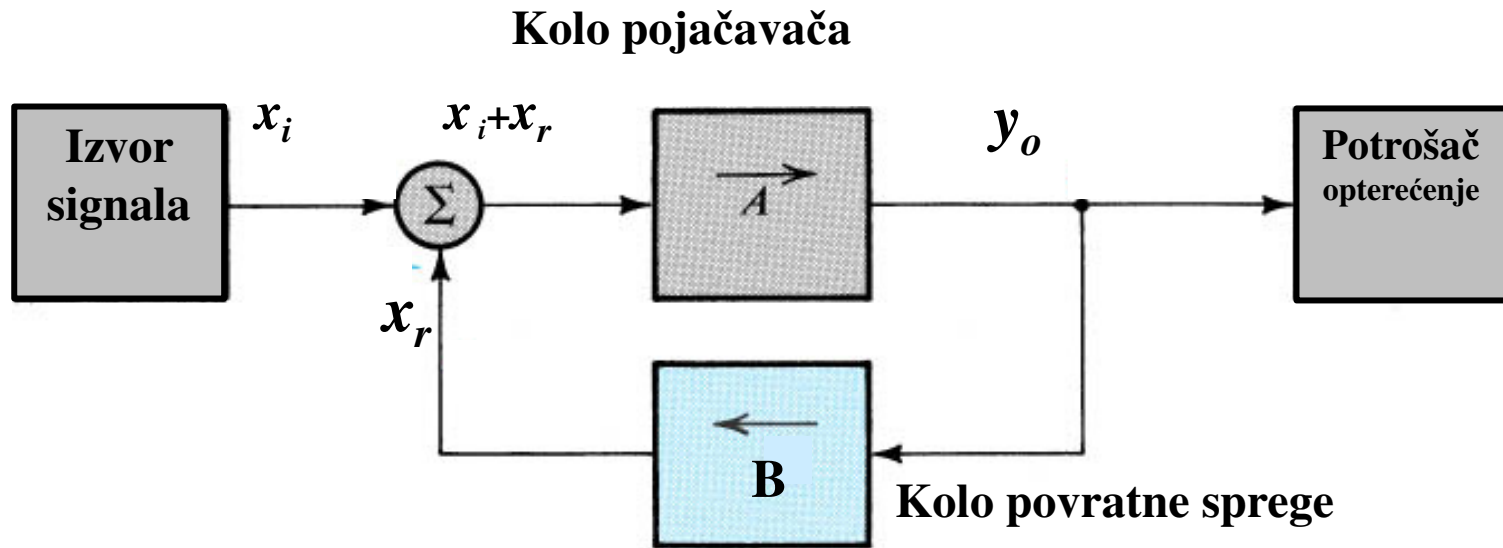
U opštem slučaju pojačavač signala (nezavisno od tipa) označićemo blokom u kome je upisano slovo **A** (*Amplifier*)



**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.



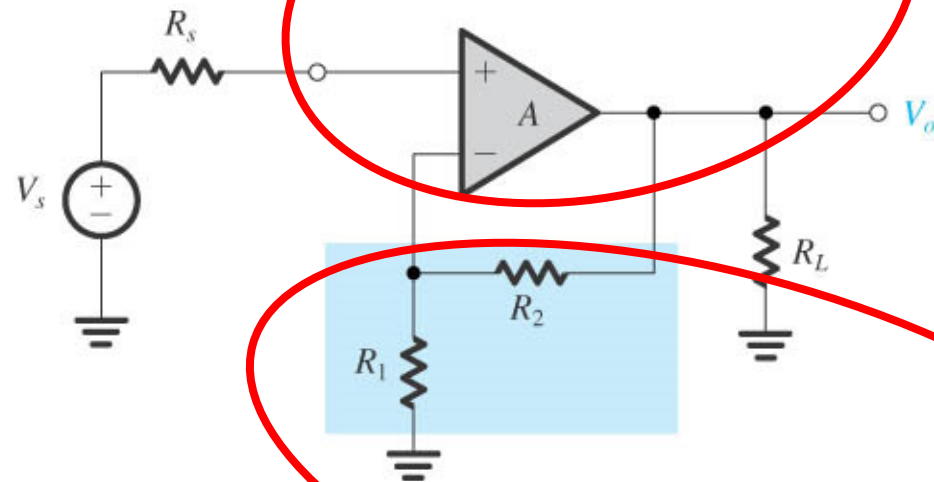
$$A = y_o / (x_i + x_r)$$

$$B = x_r / y_o$$

$$A_r = y_o / x_i$$

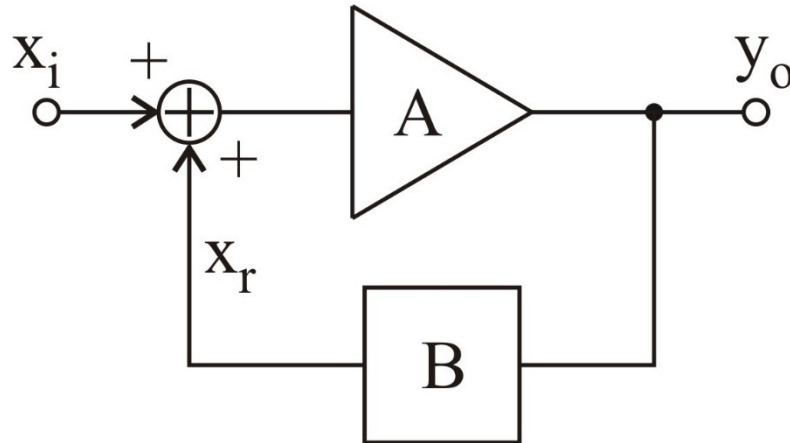
# Primer realne realizacije

**Kolo pojačavača**



**Kolo povratne sprege**

## Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.



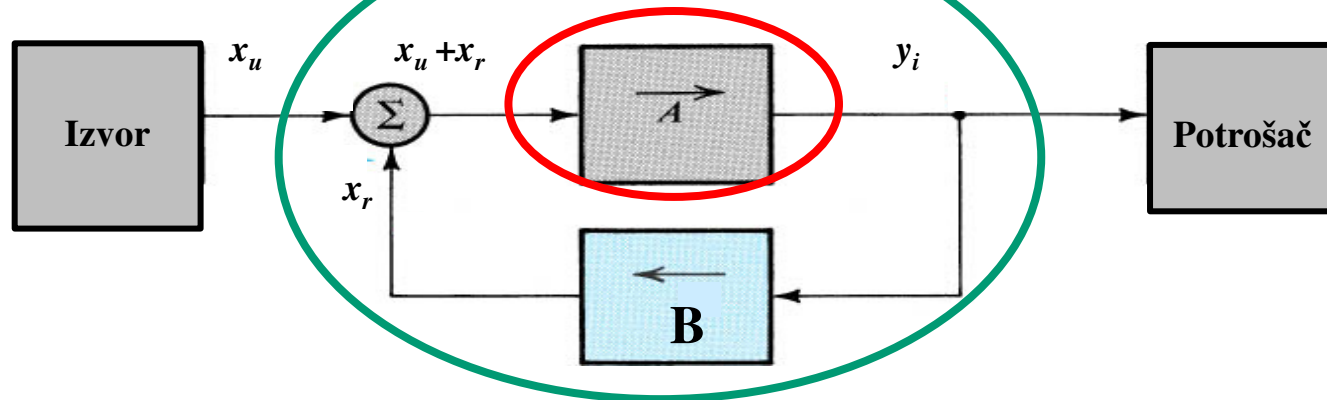
$$A(x_i + x_r) = y_o$$

$$x_r = B \cdot y_o$$

---

$$A_r = \frac{y_o}{x_i} = \frac{A}{1 - A \cdot B}$$

# Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

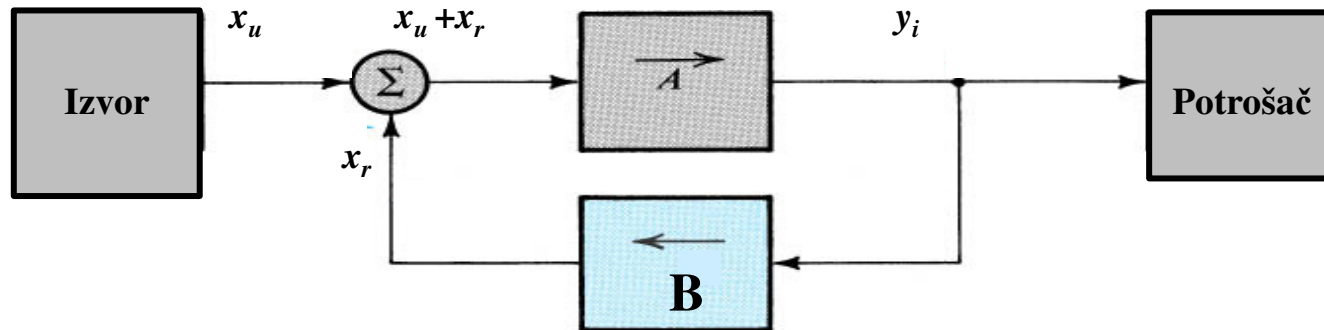


$$A_r = \frac{A}{1 - AB}$$

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**

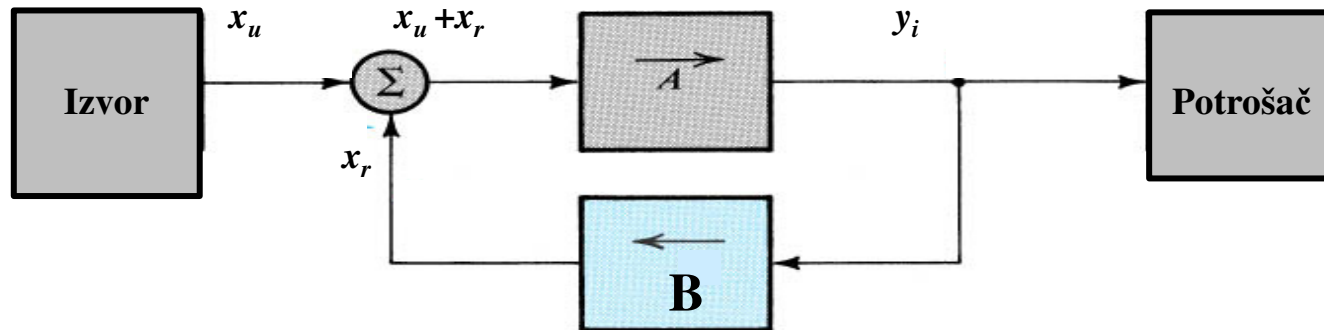
$$F(j\omega) = 1 - A(j\omega) \cdot B$$

**Kružno pojačanje**

$$A(j\omega) \cdot B$$



## Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

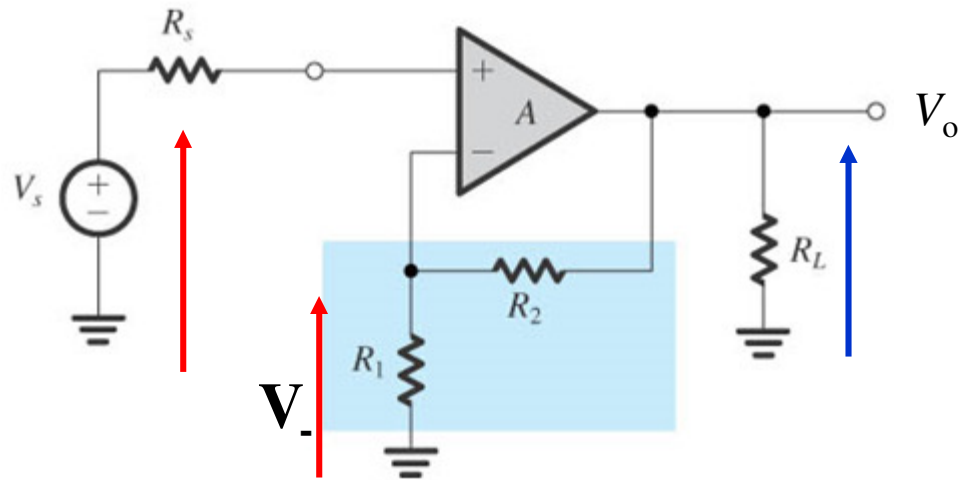


$$A_r = \frac{A}{1 - AB}$$

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



**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)*

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

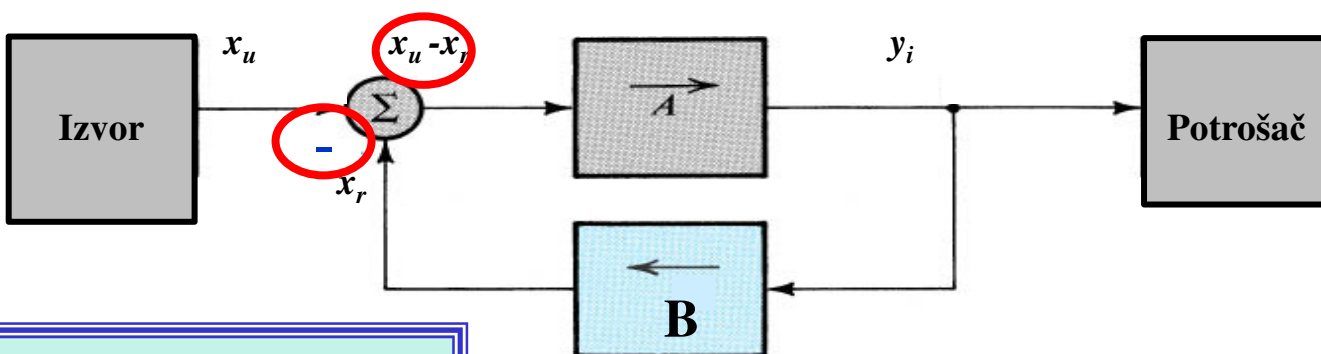
$$A_r = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 - AB} = \frac{10000}{1 + 10000 \cdot 0,1} = \frac{10000}{1001} \approx 10$$

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

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

## Opšta struktura pojačavača sa povratnom spregom.

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

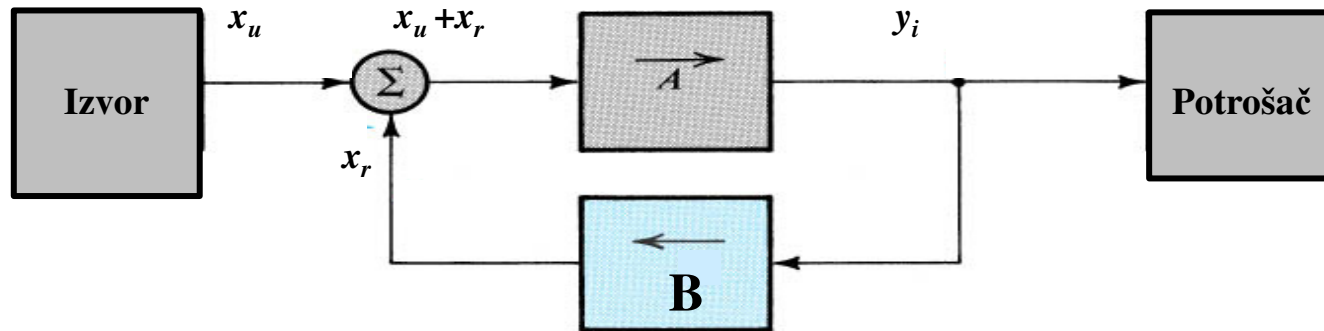


$$A_r = \frac{A}{1 + AB}$$

Mi ćemo koristiti

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

## 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**

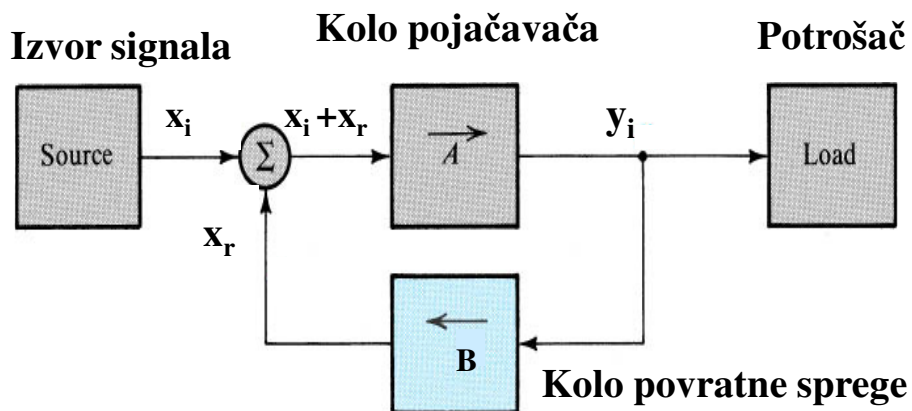
$$A_r = \frac{A}{1-AB}$$

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



## NEGATIVNA POVRATNA SPREGA

$$1 - AB > 1$$

$$A_r = \frac{A}{1 - AB} \quad \rightarrow \quad A_r < A$$

- **Signal reakcije**,  $x_r$ , vraća se u protiv fazi sa **ulaznim signalom**  $x_i$  !
- Signal na ulazu pojačavača se smanjuje, tako da se i vrednost izlaznog signala smanjuje.
- Da bi se ostvarila negativna povratna sprega neophodno je da osnovni pojačavač obrće fazu, jer je kolo povratne sprege ne obrće fazu (otprono kolo)  $B > 0$ . Kao osnovni pojačavač koristi se pojačavač u sprezi sa zajedničkim emitorom ili zajedničkim sorsom, za koji je  $A < 0$ .

$$1-AB > 1 \quad \rightarrow \quad A_r = \frac{A}{1-AB} \quad A_r < A \quad \text{NEGATIVNA}$$

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.
5. Menja vrednosti ulazne i izlazne impedanse.

# **Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača**



## Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Parametri kola menjaju vrednost usled promena temperature, starenja, varijacija napona 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  $g_m = 100 \text{ mA/V}$ ,  $r_o = 50 \text{ k}$  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 odstupanje je  $\Delta A/A = 19\%$

## Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

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

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

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

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

## Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Da bi se sagledao uticaj promene parametra kola na karakteristike pojačavača uvodi se logaritamska osetljivost (relativna osetljivost). Primera radi logaritamska osetljivost pojačanja pojačavača na promene parametra  $p$  definiše se kao:

$$S_p^A = \frac{\partial \ln(A)}{\partial \ln(p)}$$

$$S_p^A = \frac{p}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial p}$$

## 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:

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

$$S_A^{A_r} = \frac{A \cdot (1 - AB)}{A} \cdot \frac{(1 - AB) + AB}{(1 - AB)^2} = \frac{1}{(1 - AB)}$$

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

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

Relativna osetljivost pojačanja na promene parametra osnovnog pojačavača

$$S_p^{A_r} = \frac{p}{A_r} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial p} = \frac{p}{A_r} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial p}$$

$$\frac{\partial A_r}{\partial A} = \frac{\partial}{\partial A} \cdot \left( \frac{A}{1 - A \cdot B} \right) = \frac{(1 - A \cdot B) + A \cdot B}{(1 - A \cdot B)^2} = \frac{1}{(1 - A \cdot B)^2}$$

---

$$S_p^{A_r} = \frac{1}{1 - AB} \cdot \frac{p}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial p}$$

$$S_p^{A_r} = \frac{1}{1 - AB} \cdot S_p^A$$



## Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

Relativna osetljivost pojačanja na promene parametra kola povratne sprege

$$S_p^{A_r} = \frac{p}{A_r} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial p} = \frac{p}{A_r} \cdot \frac{\partial A_r}{\partial B} \cdot \frac{\partial A}{\partial p}$$

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

---

$$S_p^{A_r} = \frac{1}{1 - AB} \cdot \frac{p}{B} \cdot \frac{\partial B}{\partial p}$$

$$S_p^{A_r} = \frac{A \cdot B}{1 - AB} \cdot S_p^B$$

# Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača

---

Na osnovu izraza za relativne osetljivosti parametara možemo da zaključimo da je osetljivost parametara pojačavača smanjena uvođenjem povratne sprege. Sa druge strane osetljivost parametara kola povratne sprege je ostala približno ista.

Osetljivost parametara kola povratne sprege je od manjeg značaja nego osetljivost parametara pojačavača. Razlog je činjenica da kolo pojačavača čine poluprovodničke komponente koje su mnogo osetljivije na ambijentalne promene u odnosu na pasivne komponente.

$$S_p^{A_r} = \frac{1}{1 - AB} \cdot \frac{p}{B} \cdot \frac{\partial B}{\partial p}$$

$$S_p^{A_r} = \frac{A \cdot B}{1 - AB} \cdot S_p^B$$

## Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost pojačavača



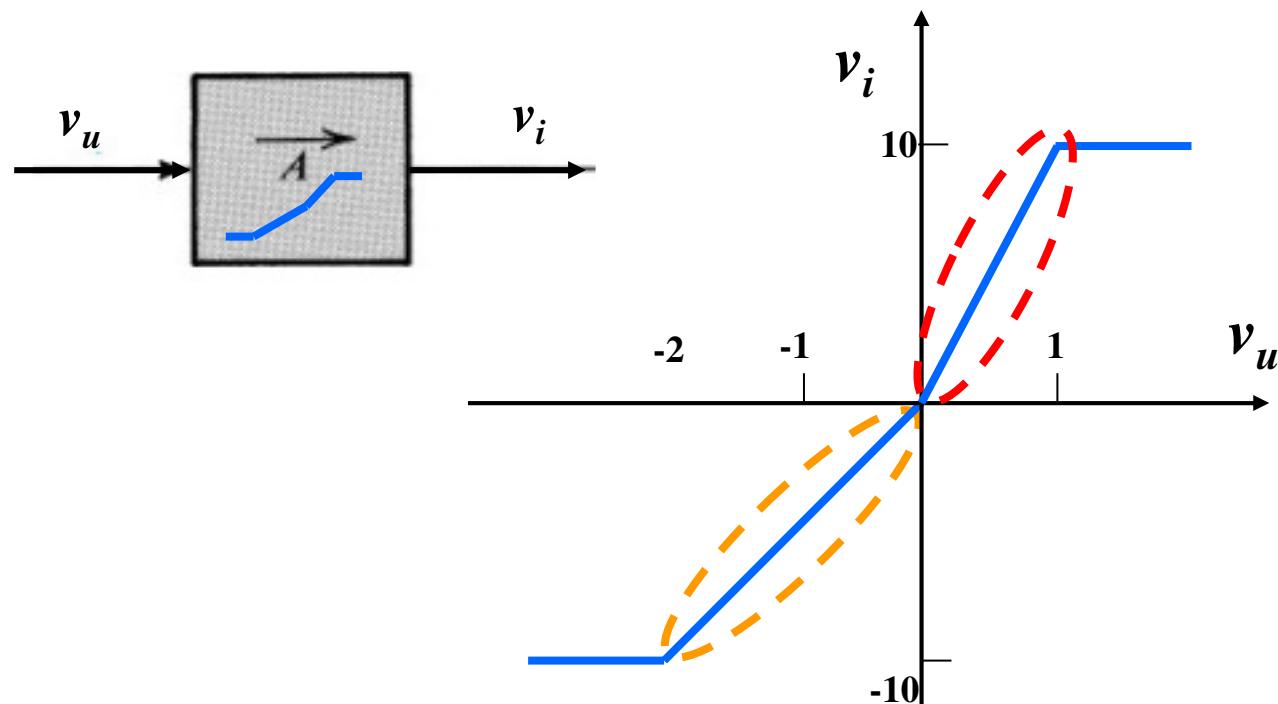
Negativna povratna sprega smanjuje osetljivost odziva na promene parametra pojačavača (u otvorenoj petlji)



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

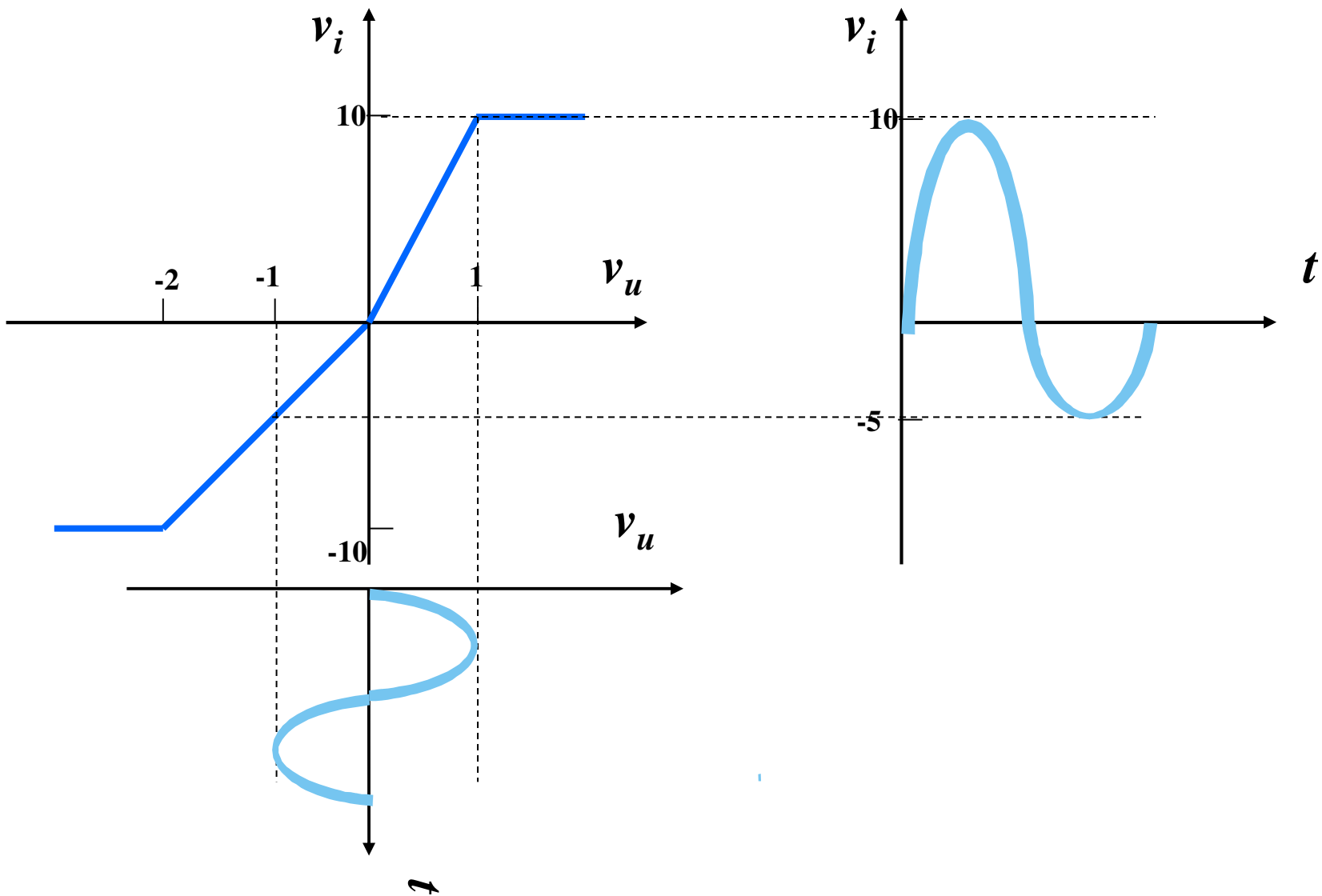
# **Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna amplitudska izobličenja**

## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

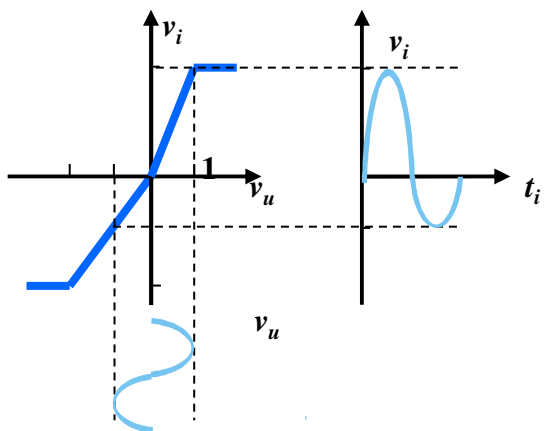


Nelinearna prenosna karakteristika sa slike prikazuje pojačanje u otvorenoj petlji (bez PS) od  $A=10$  za  $0 < v_u < 1$  i  $A=5$  za  $-2 < v_u < 0$ .

# Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



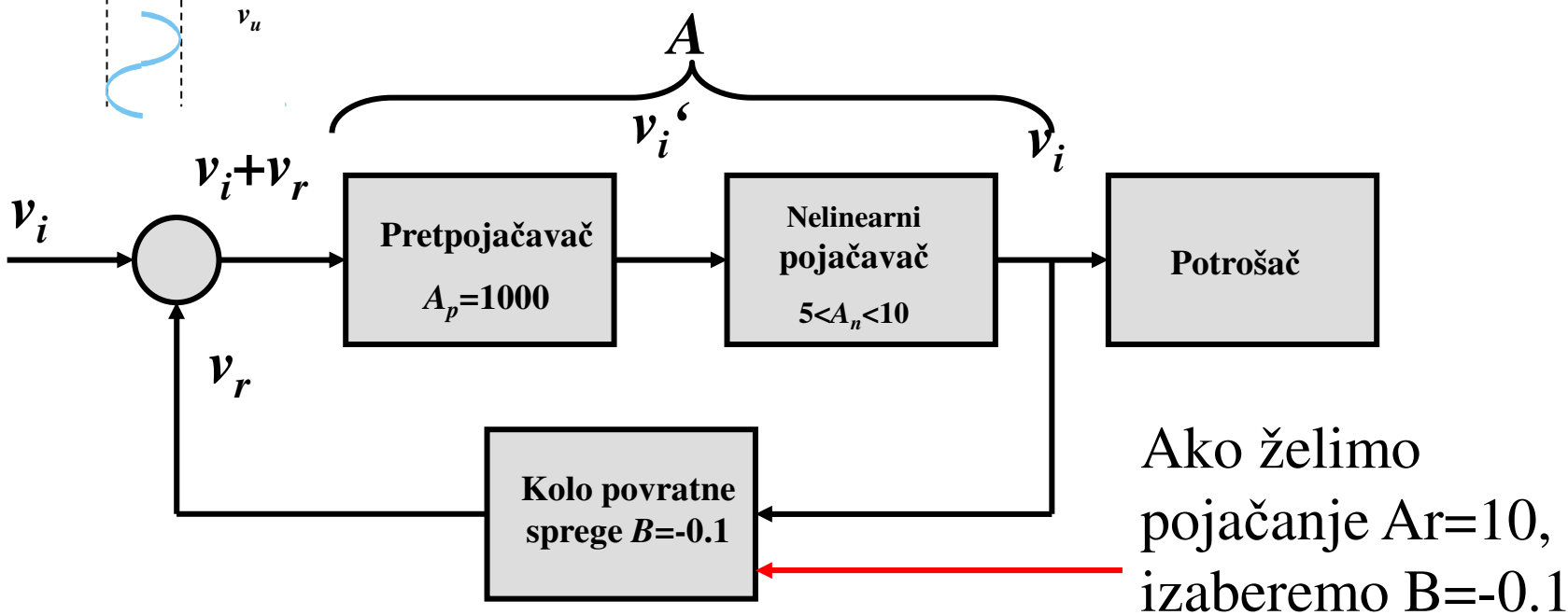
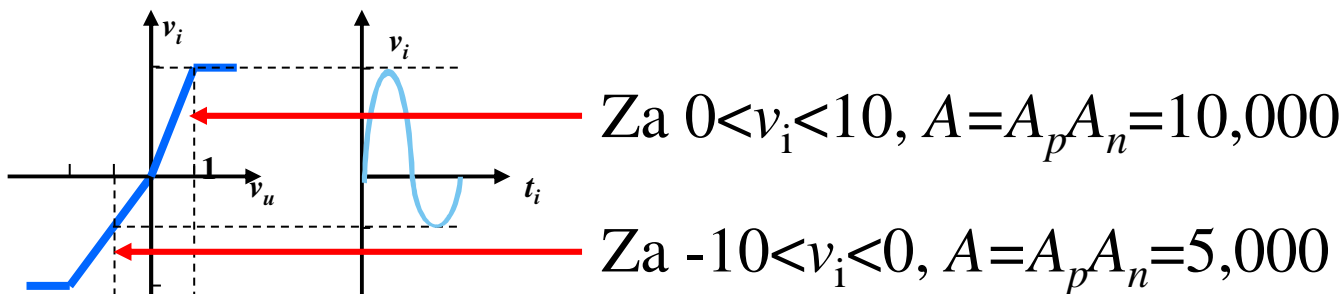
Uvođenjem NPS izobličenja mogu da se smanje.

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

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

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 sprege na nelinearna izobličenja





## 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  $v_r = Bv_o = B \frac{A}{(1-AB)} v_i = \frac{AB}{(1-AB)} v_i$

dobija se

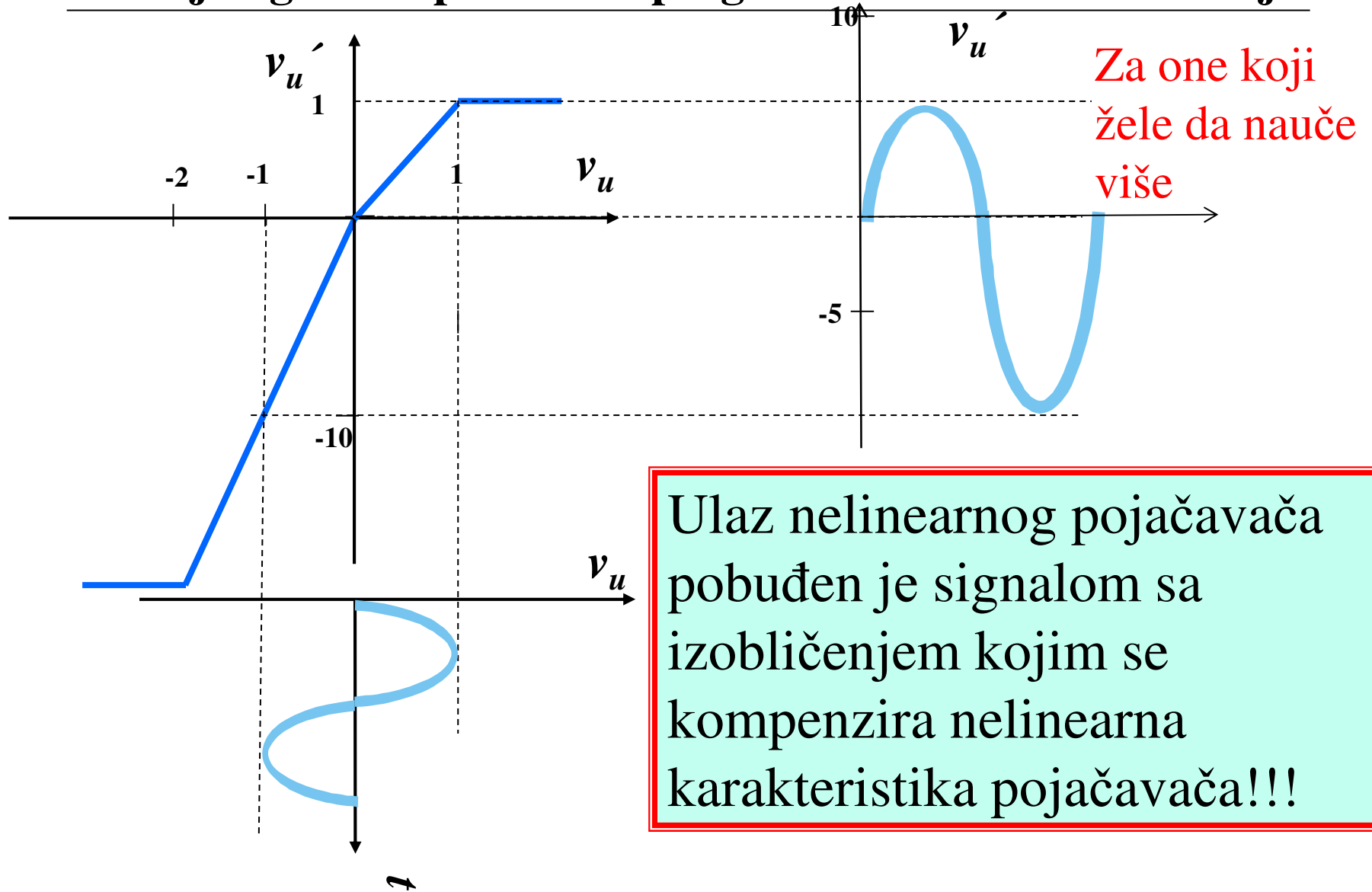
$$v_i' = A_1(v_i + v_r) = A_1\left(v_i + \frac{AB}{1-AB} v_i\right) = \frac{A_1}{(1-AB)} v_i$$

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

**i**

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

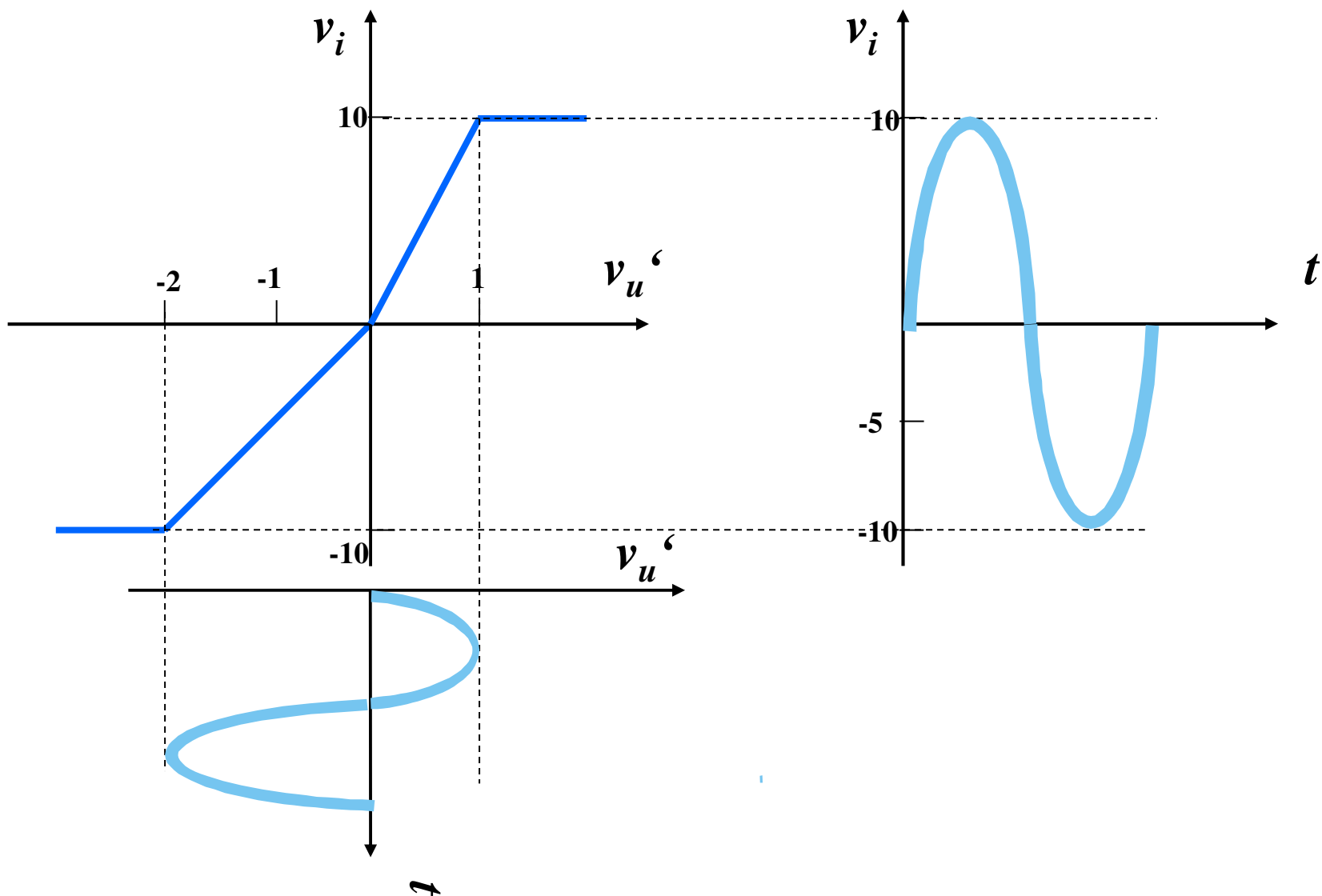
# Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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

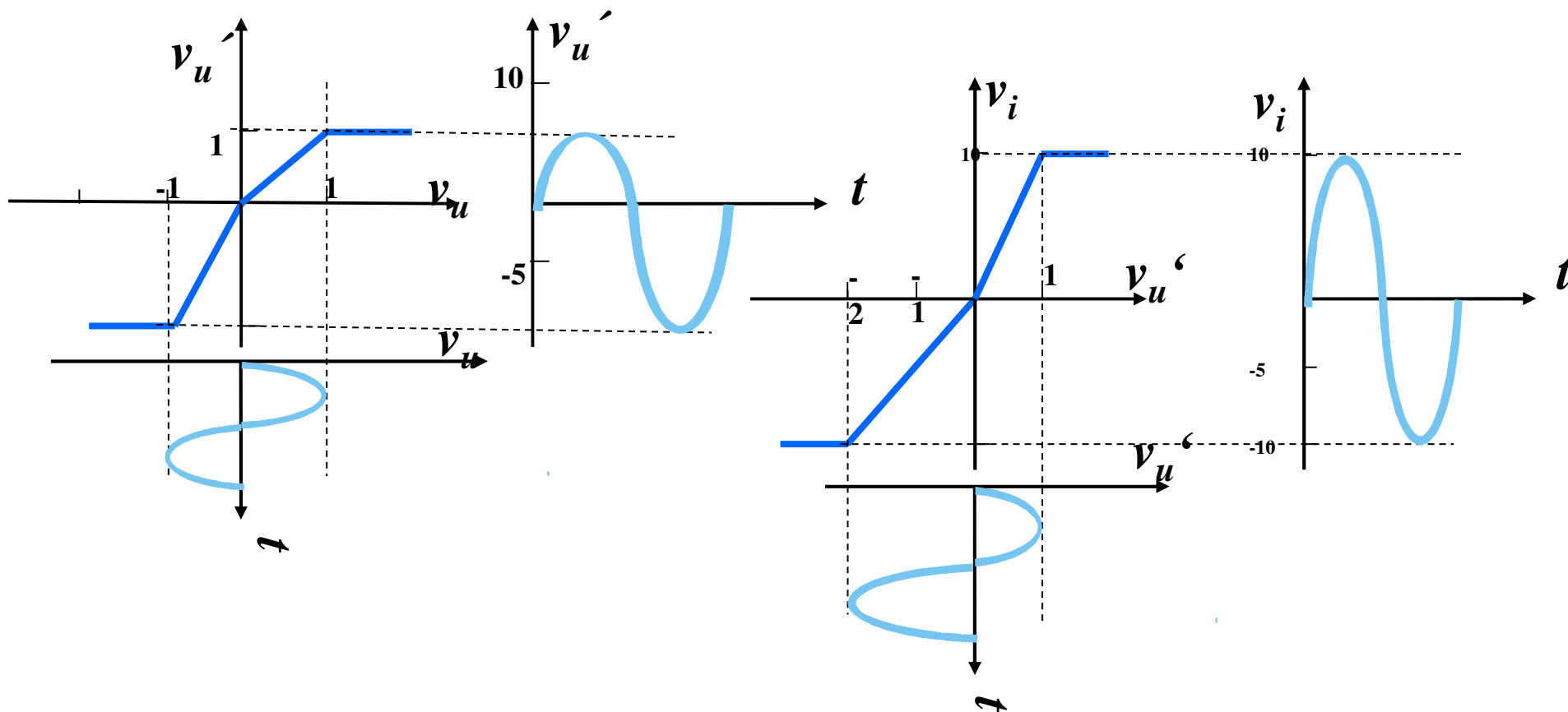
Za one koji žele da nauče više

## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



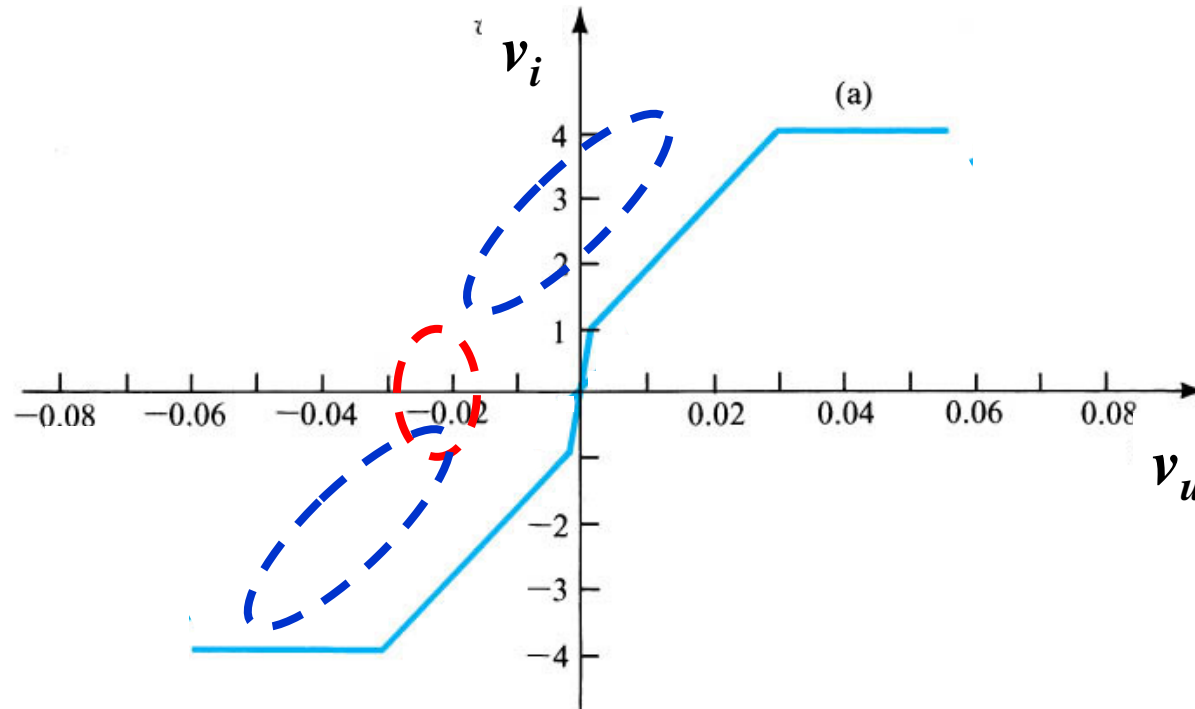
Za one koji žele da nauče više

## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



Za one koji žele da nauče više

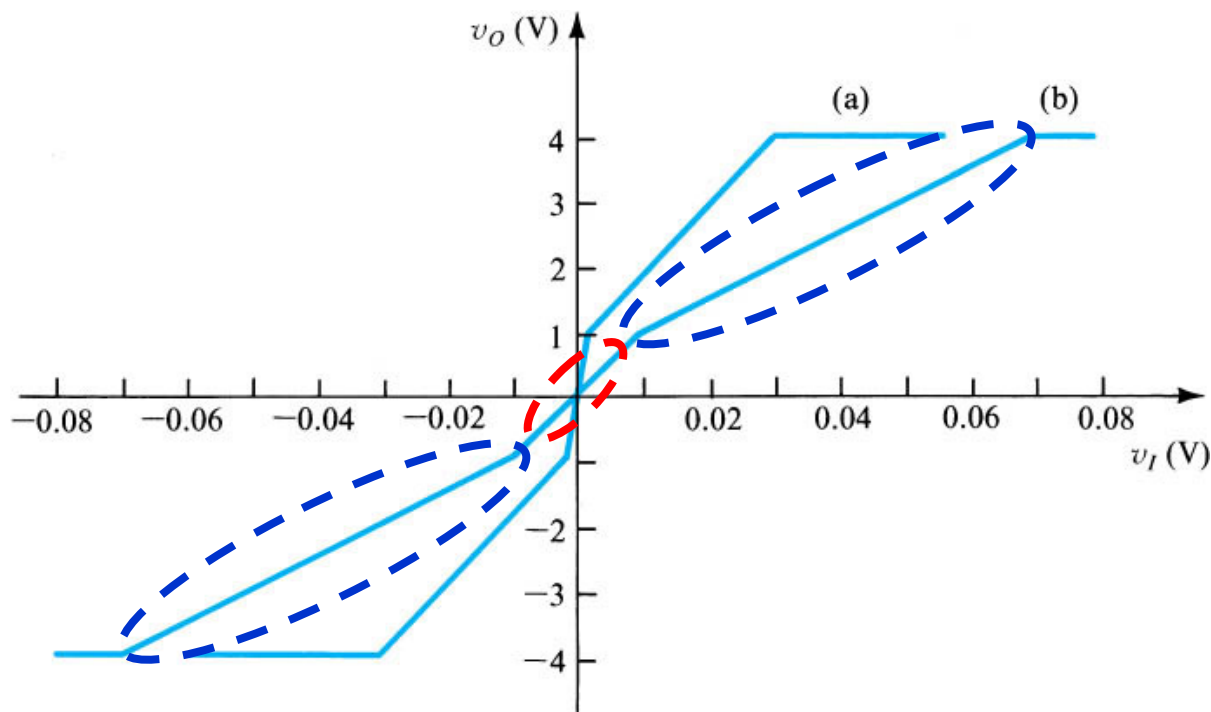
## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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

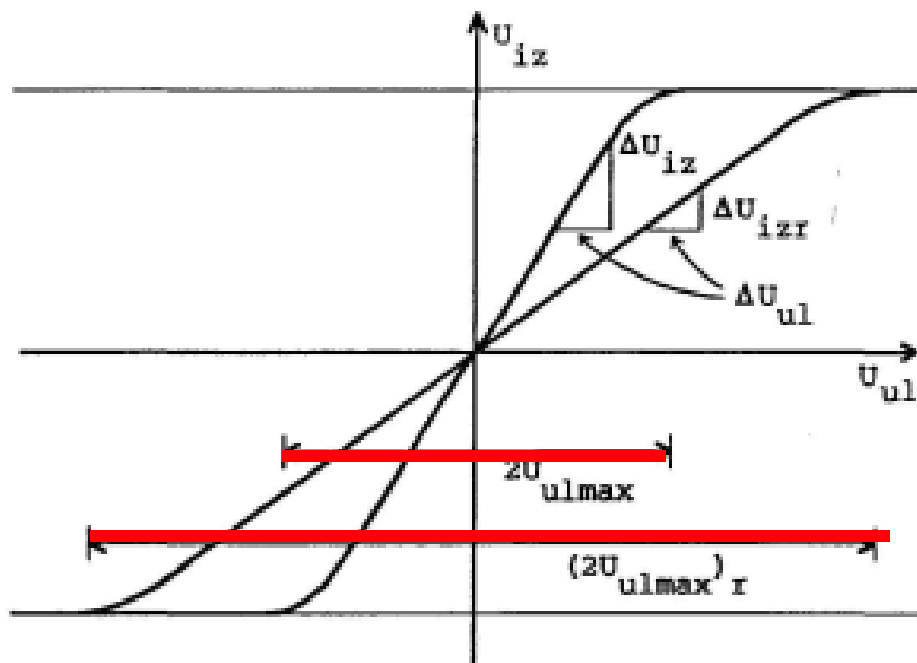
## Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja



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

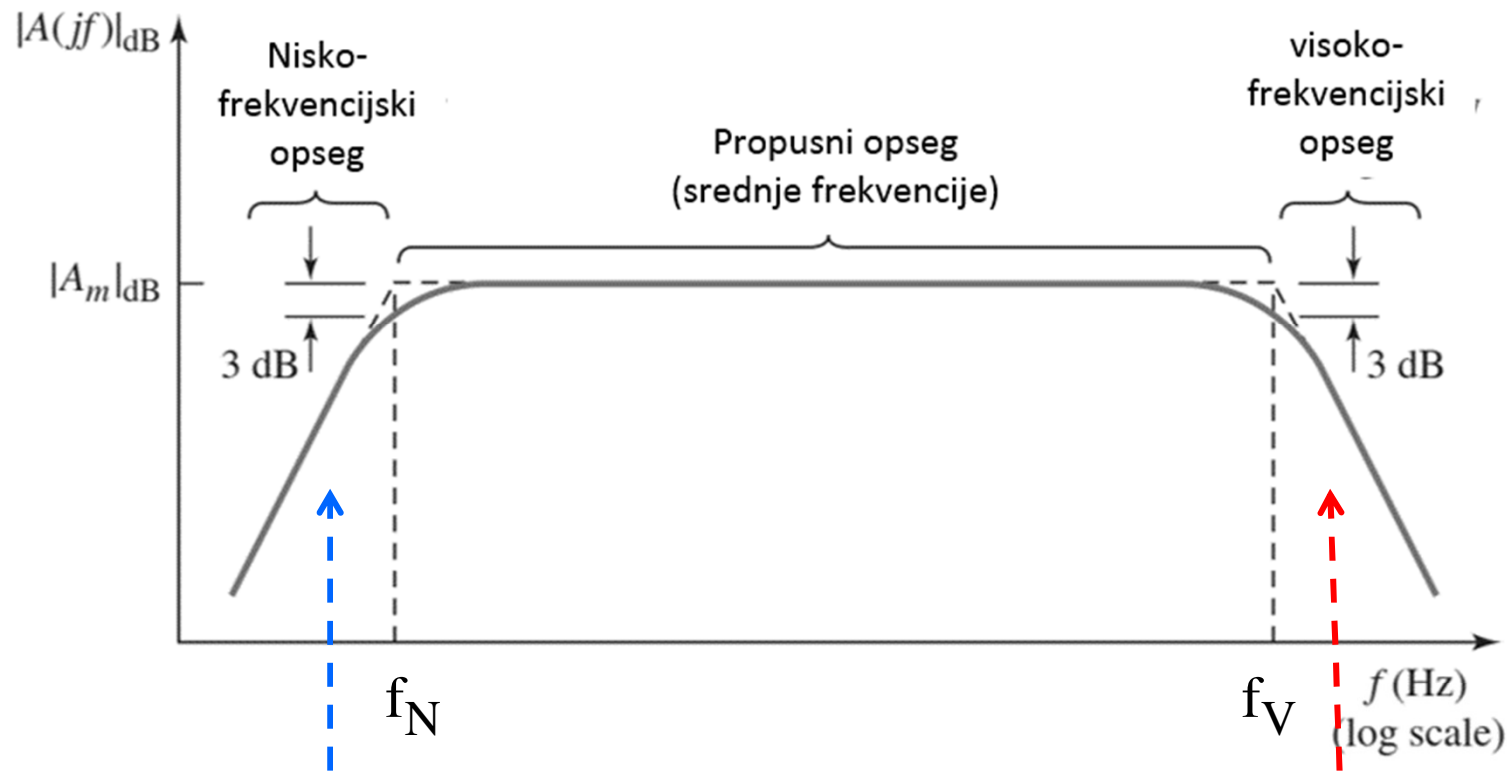
---

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



$$A(j\omega) \approx A_0 \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_N}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_N}}$$

$$A(j\omega) \approx \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_V}}$$

# Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

U visoko-frekvencijskom opsegu primenjujemo aproksimaciju frekvencijske karakteristike naponskog pojačanja pojačavača koja odgovara najjednostavnijem propusniku niskih frekvencija, odnosno sadrži jednu nulu.

Nakon što se zameni frekvencijska zavisnost za pojačanje osnovnog pojačavača dobija se izraz za frekvencijsku zavisnost pojačavača sa povratnom spregom. Dobija se da je gornja granična frekvencija pojačavača sa povratnom spregom veća  $(1 - A_0 B)$  puta.

Frekvencijska zavisnost u visoko-frekvencijskom opsegu

Gornja granična frekvencija kola sa povratnom spregom

$$A(j\omega) \approx \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_V}}$$

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

$$A_r(j\omega) \approx \frac{A_0}{1 - A_0 \cdot B} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_V \cdot (1 - A_0 \cdot B)}}$$

$$A_r(j\omega) \approx A_{or} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{Vr}}}$$

$$\omega_{Vr} = \omega_V \cdot (1 - A_0 \cdot B)$$

$$A_{or} = \frac{A_0}{1 - A_0 \cdot B}$$

# Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

U niskofrekvencijskom opsegu primenjujemo aproksimaciju frekvencijske karakteristike naponskog pojačanja pojačavača koja odgovara propusniku visokih frekvencija, odnosno sadrži jednu nulu u koordinatnom početku i jedan pol.

Nakon što se zameni frekvencijska zavisnost za pojačanje osnovnog pojačavača dobija se izraz za frekvencijsku zavisnost pojačvača sa povratnom spregom. Dobija se da je donja granična frekvencija pojačavača sa povratnom spregom manja  $(1-A_0B)$  puta.

Frekvencijska zavisnost u nisko-frekvencijskom opsegu

Donja granična frekvencija kola sa povratnom spregom

$$A(j\omega) \approx A_0 \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_N}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_N}}$$

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

$$A_r(j\omega) \approx \frac{A_0}{1 - A_0 \cdot B} \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_N} \cdot (1 - A_0 \cdot B)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_N} \cdot (1 - A_0 \cdot B)}$$

$$A_r(j\omega) \approx A_{or} \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_{Nr}}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{Nr}}}$$

$$\omega_{Nr} = \frac{\omega_N}{(1 - A_0 \cdot B)}$$

$$A_{or} = \frac{A_0}{1 - A_0 \cdot B}$$

## 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

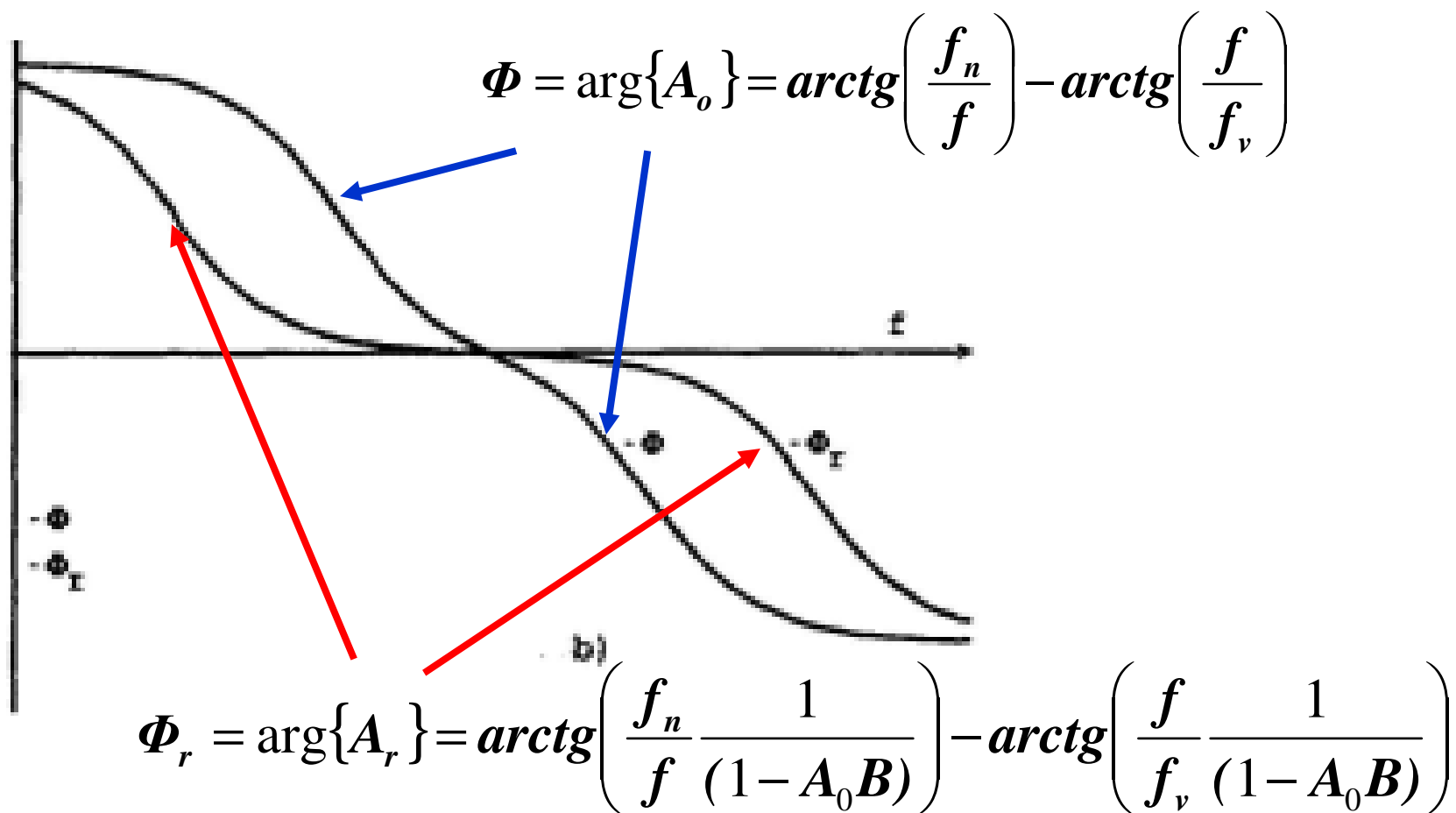
$$\Phi_r = \arg\{A_r\} = \arctg\left(\frac{f_{nr}}{f}\right) - \arctg\left(\frac{f}{f_{vr}}\right)$$

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

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

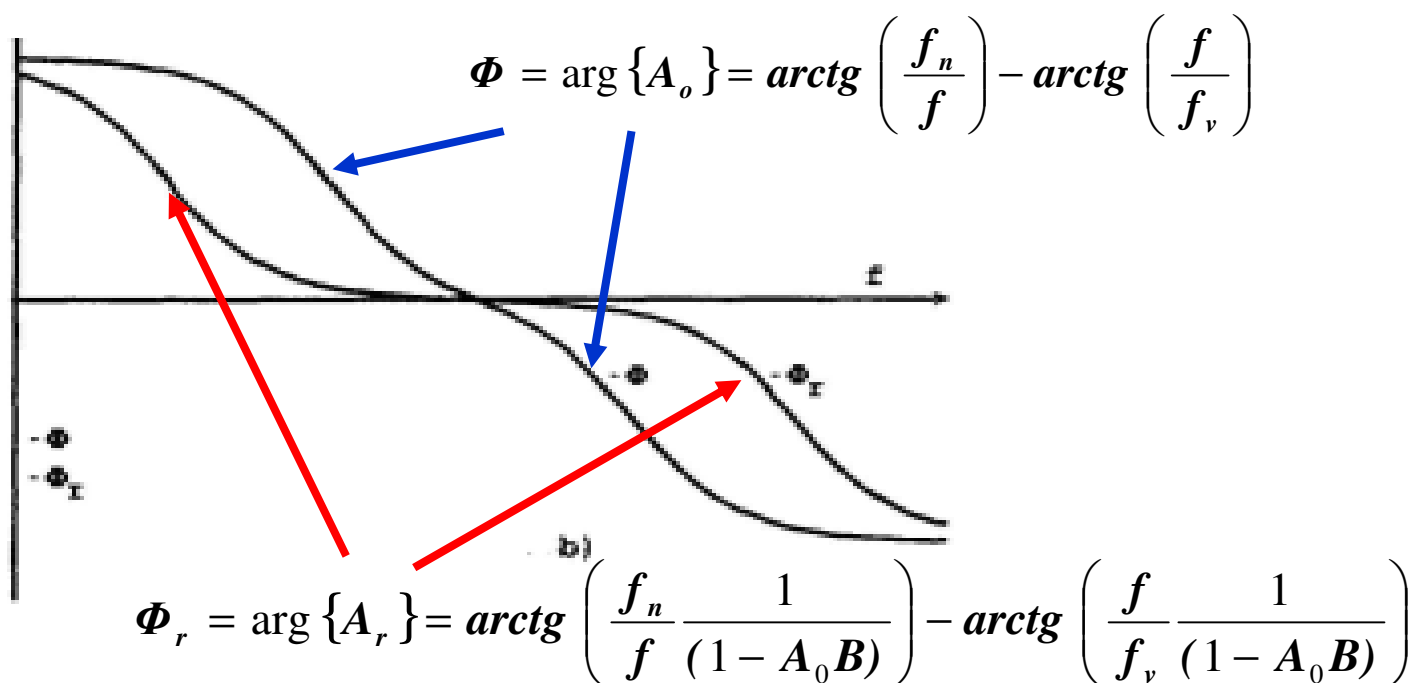
## Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

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:

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

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

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

Za one koji žele da nauče više

## Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

---

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

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

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

## Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijske karakteristike

---



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



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



- smanjuje pojačanje.
- povećava nelinearna fazna izobličenja.

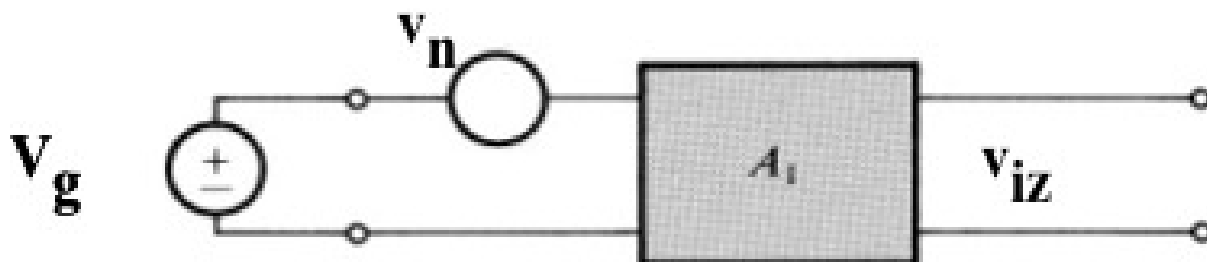
# **Uticaj negativne povratne sprege na šumove**

## 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  $v_n$



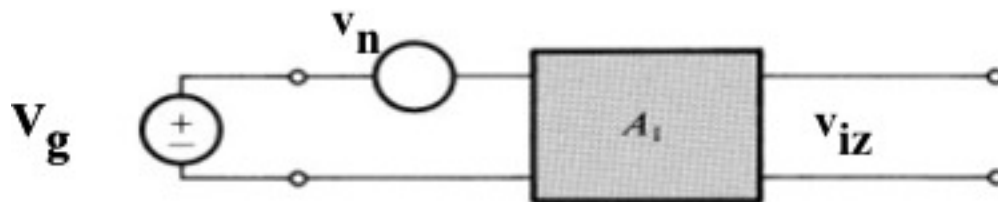
Odnos signal-šum na ulazu:

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



## Uticaj negativne povratne sprege na šumove

---



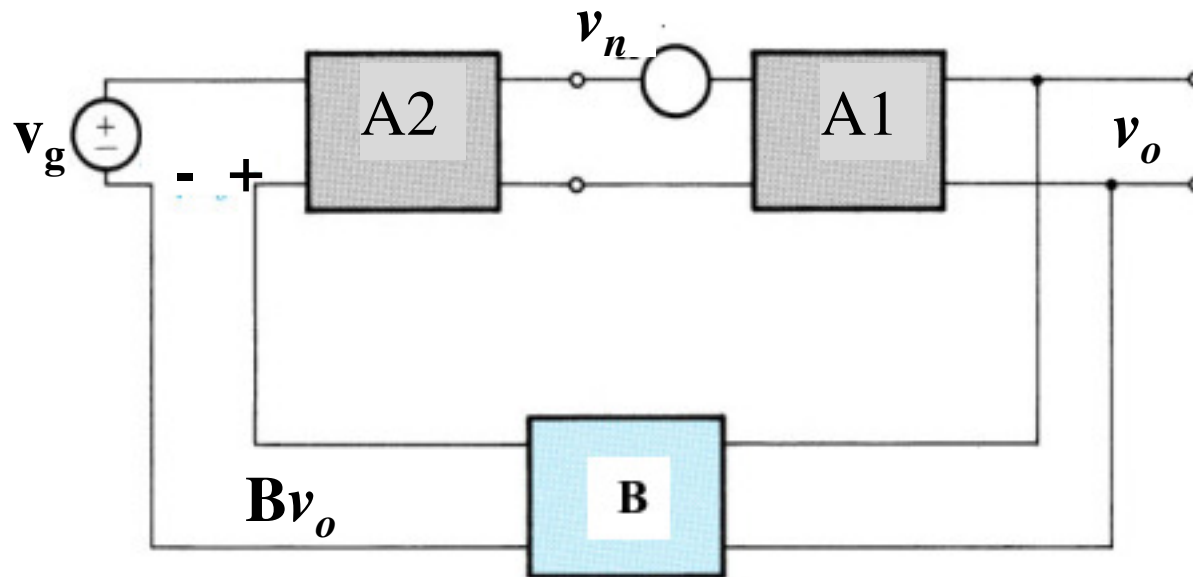
$$v_{iz} = A_1(v_g + v_n)$$

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

## Uticaj negativne povratne sprege na šumove



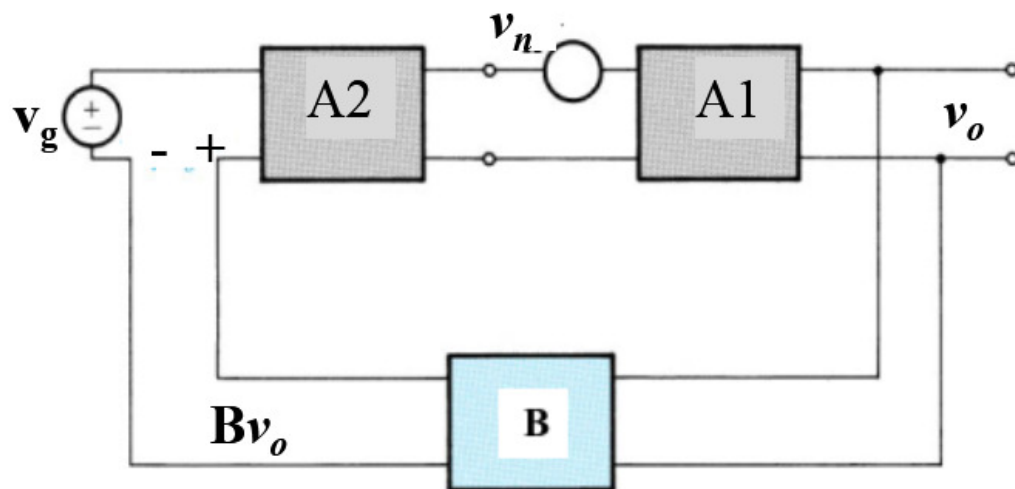
$$((v_g - Bv_o)A_2 + v_n) \cdot A_1 = v_o$$

$$A_1 \cdot A_2 \cdot v_g - B \cdot A_1 \cdot A_2 v_o + A_1 \cdot v_n = v_o$$

$$A_1 \cdot A_2 \cdot v_g + A_1 \cdot v_n = v_o + B \cdot A_1 \cdot A_2 v_o = (1 + B \cdot A_1 \cdot A_2) v_o$$

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

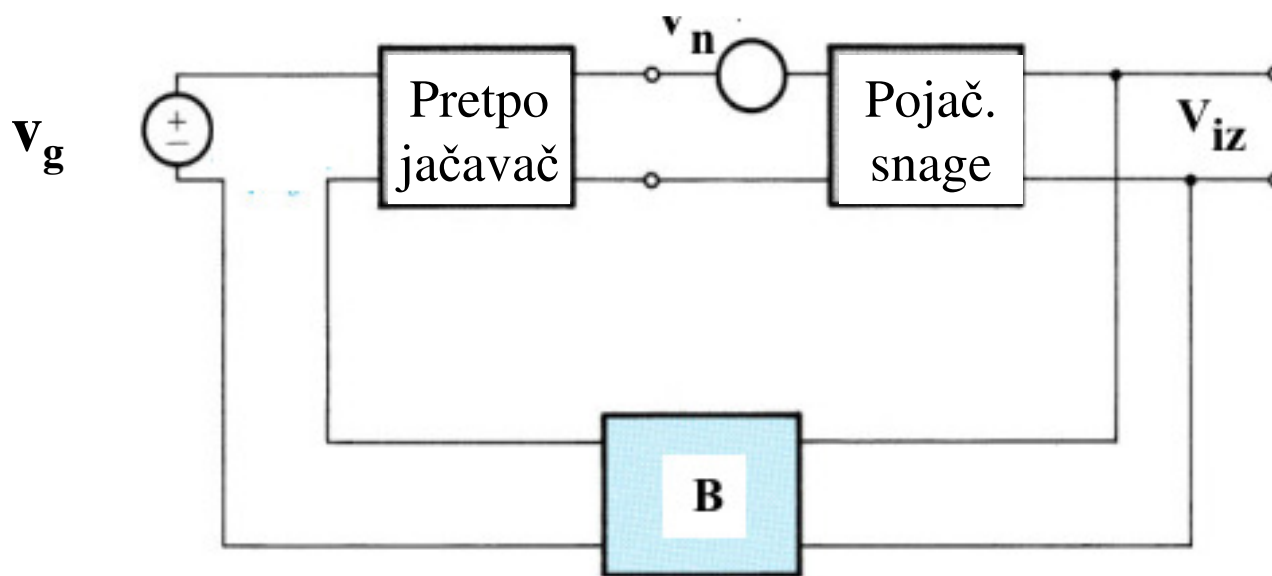
## Uticaj negativne povratne sprege na šumove



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

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 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

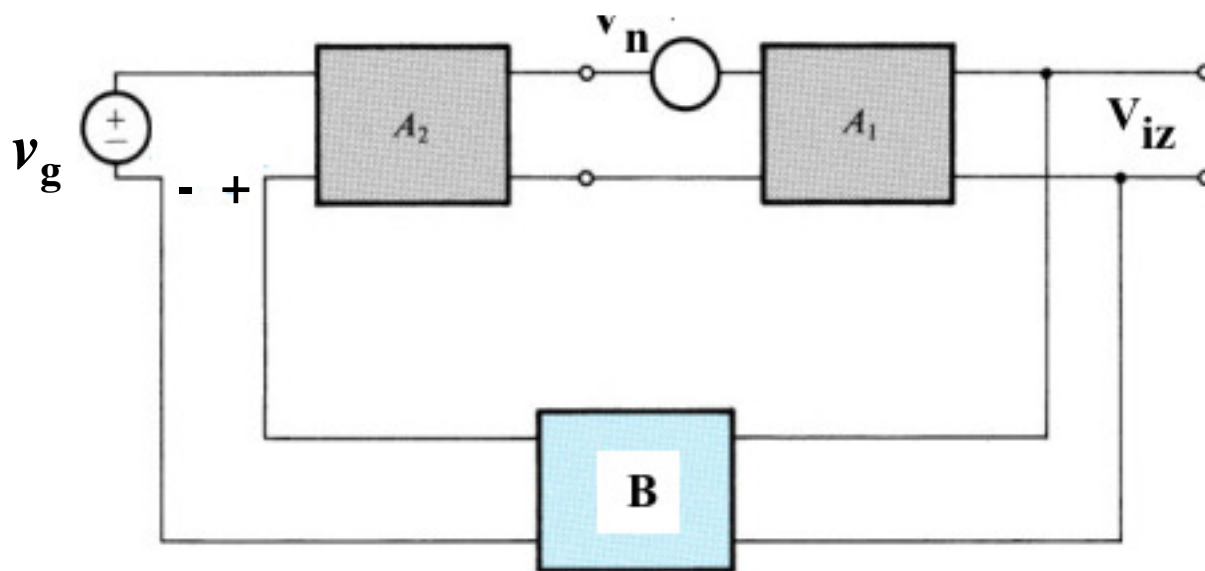
---

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

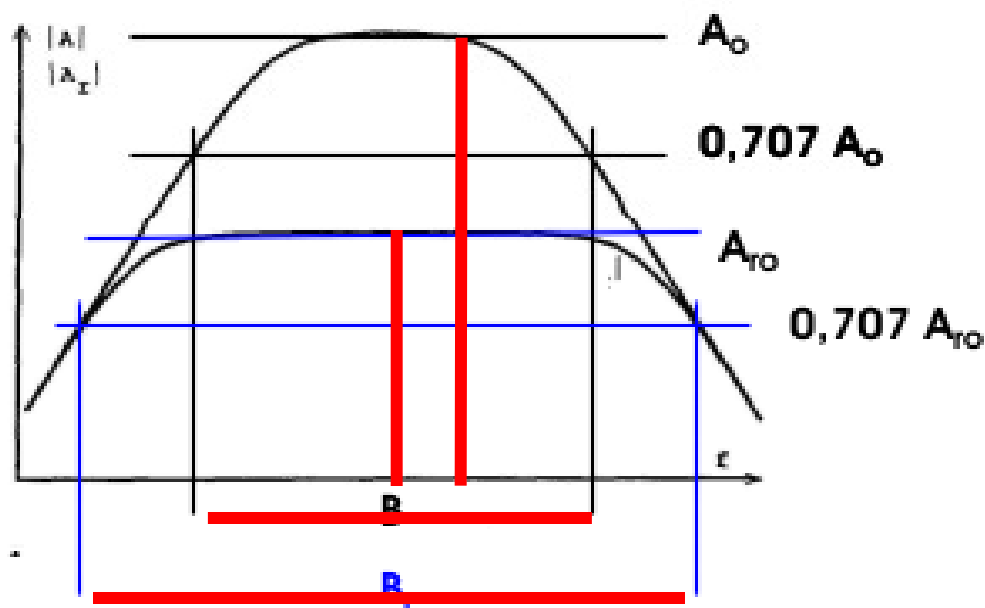
## Domaći :

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

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



## 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!**

## Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku

---

Propusni opseg pojačavača sa  $f_v \gg f_n$

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

odnosno za pojačavač sa PS

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

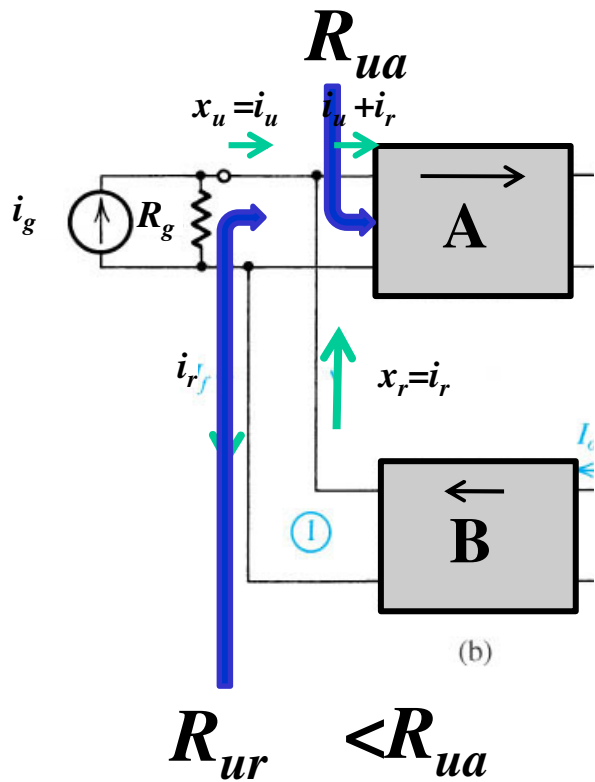


# Načini realizacije pojačavača sa NPS

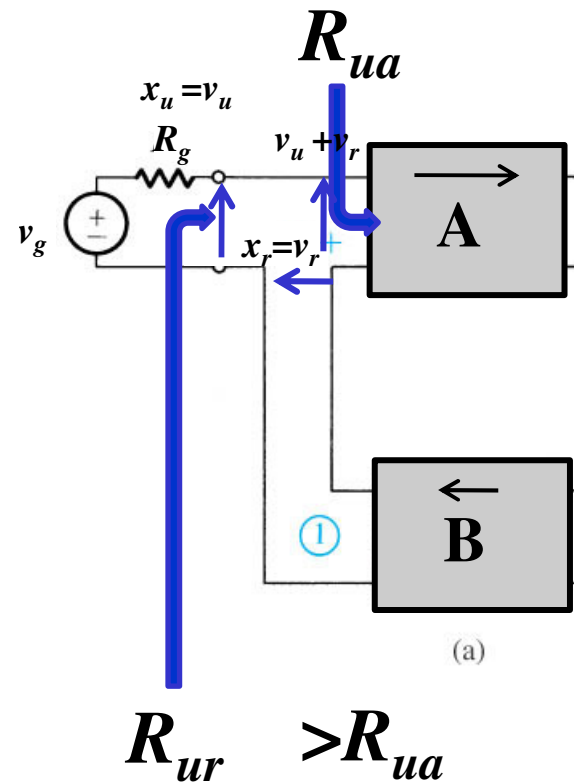
# 1. Tipovi realizacije NPS

## Priključivanje na ulazu:

### Paraleno



### Redno

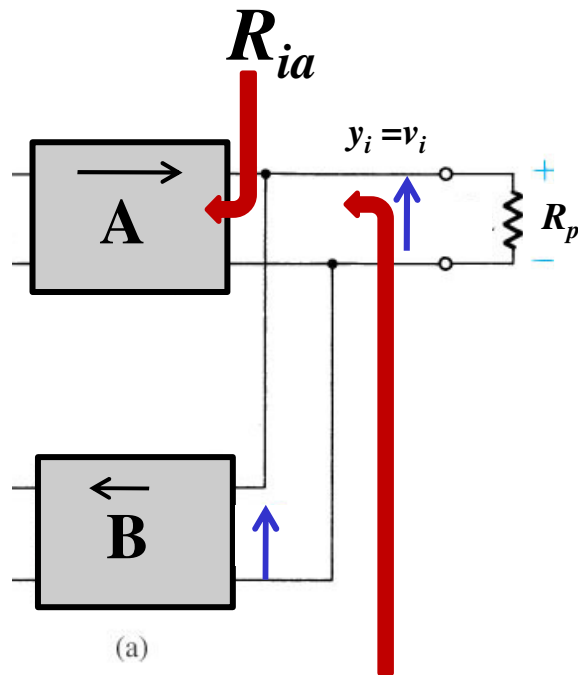


**Kolo povratne sprege menja ulaznu otpornost (impedansu)!!!**

# 1. Tipovi realizacije NPS

Vraćeni signal sa izlaza proporcionalan je:

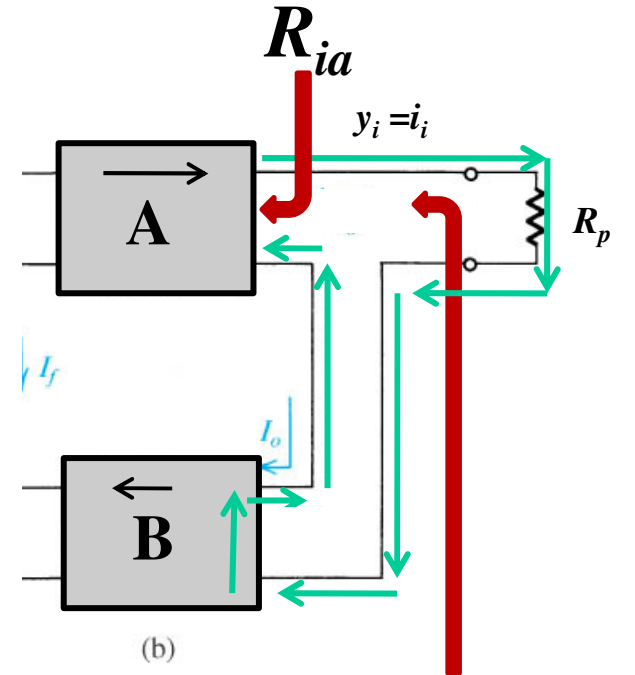
Naponu



$$R_{ir} < R_{ia}$$

ili

Struji



$$R_{ir} > R_{ia}$$

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

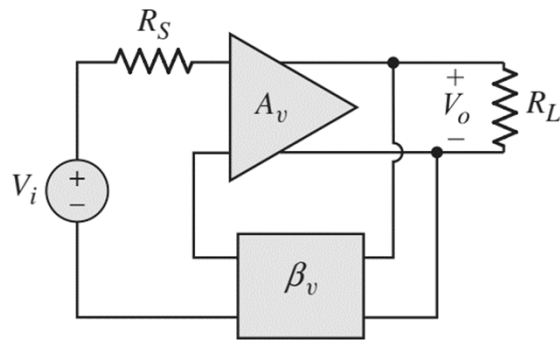
# 1. Tipovi realizacije NPS

---

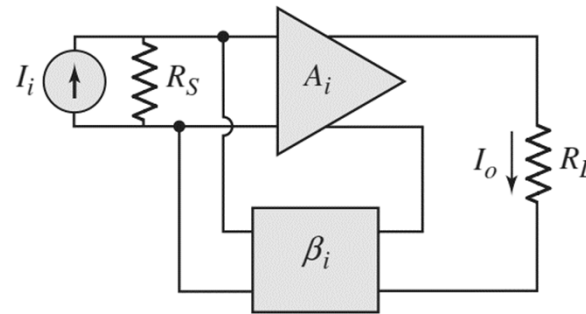
- a) **Paralelno naponska**
- b) **Redno strujna**
- c) **Paralelno strujna**
- d) **Redno naponska**

# 1. Tipovi realizacije NPS

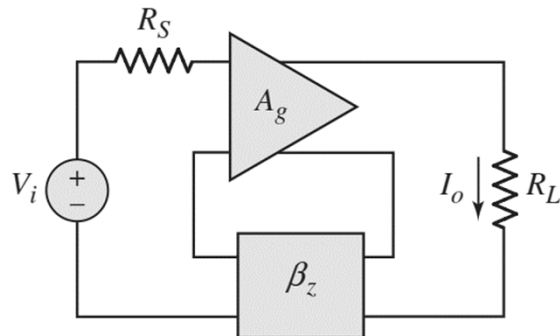
Postoje 4 tipa povratne sprege zavisno do načina na koji su povezani kolo osnovnog pojačavača A i kolo povratne sprege B. Ova dva četvoropola mogu da se povežu na ulazu (ili izlazu) redno ili paralelno. Kada su na određenom pristupu (ulaznom ili izlaznom) povezani redno to znači da na tom pristupu imaju istu struju. Isto tako kada su na određenom pristupu dva četvoropola povezana paralelno to znači da na tom pristupu imaju isti napon.



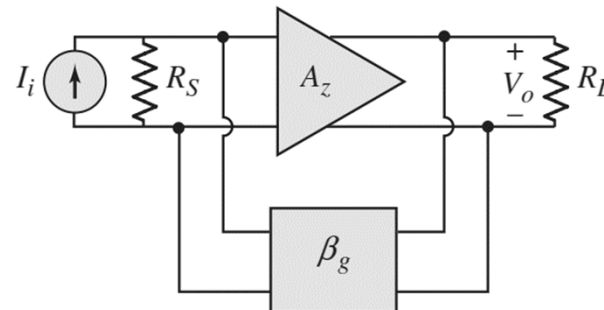
Redno-naponska  
(redno-paralelna)



Paralelno-strujna  
(paralelno-redna)



Redno-strujna  
(redno-redna)



Paralelno-naponska  
(paralelno-paralelna)

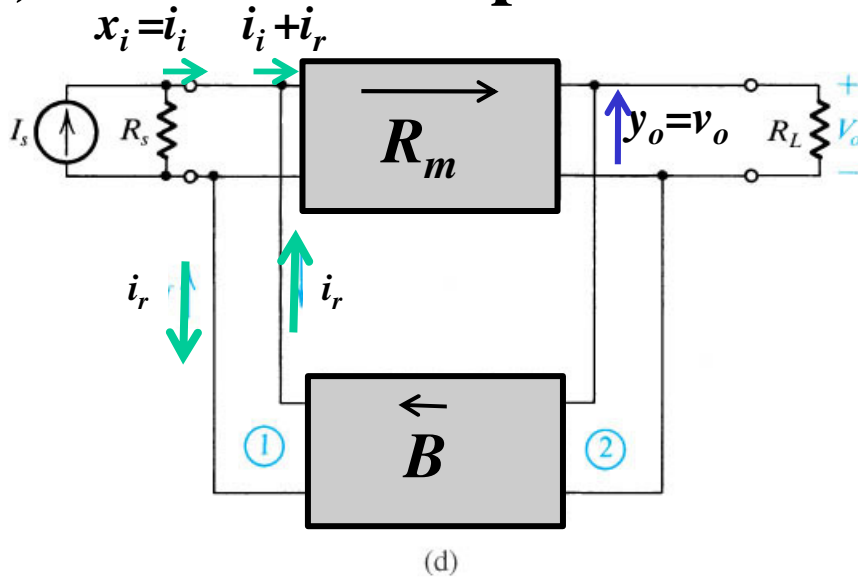
## Analiza kola sa povratnom spregom preko četvorpol

Prenosna funkcija kola sa reakcijom može odrediti na sledeći način:

- Uoče se generator, potrošač, četvoropol kola reakcije i četvoropol osnovnog pojačavača.
- Nakon što se utvrdi tip povratne sprege izdvoji se kolo reakcije iz pojačavača i odrede se njegovi parametri po definiciji.
- Formira se modifikovano kolo osnovnog pojačavača tako što se u kompletnom pojačavaču ukloni kolo reakcije, a na mestima na kojima je ono uklonjeno dodaju se admitanse (ili impedanse) na ulaznom pristupu (ulazni parametar kola povratne sprege) i na izlaznom pristupu (izlazni parametar kola povratne sprege).
- Primeni se opšta formula za pojačanje pojačavača sa povratnom spregom pri čemu koeficijent poveratne sprege predstavlja povratni parametar kola povratne sprege.

# 1. Tipovi realizacije NPS

## a) Paralelno naponska



$$R_{mr} = \frac{v_o}{i_i} = \frac{R_m}{1 - R_m \cdot B}$$

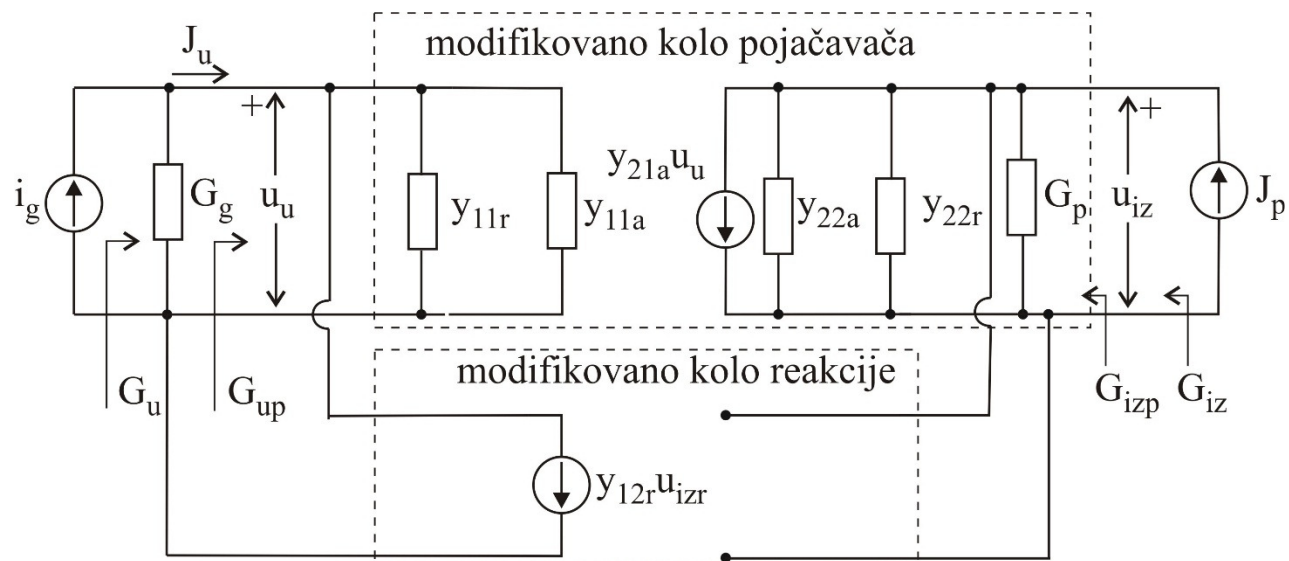
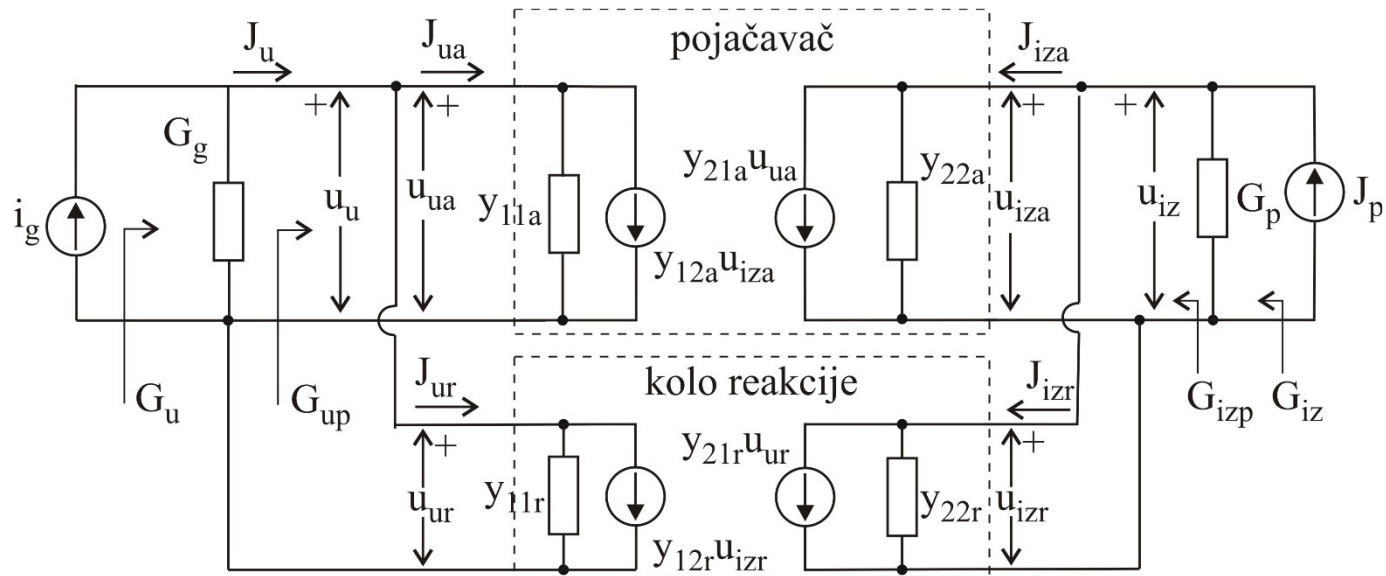
$$R_{ir} = \frac{R_{ia}}{(1 - R_m B)} < R_{ia}$$

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

Izlazna veličina je napon jer je signal koji se vraća preko kola povratne sprege srazmeran izlaznom naponu. Ulazna veličina je struja jer se na ulazu pojačavača struja reakcije oduzima od ulazne struje.

# 1. Tipovi realizacije NPS

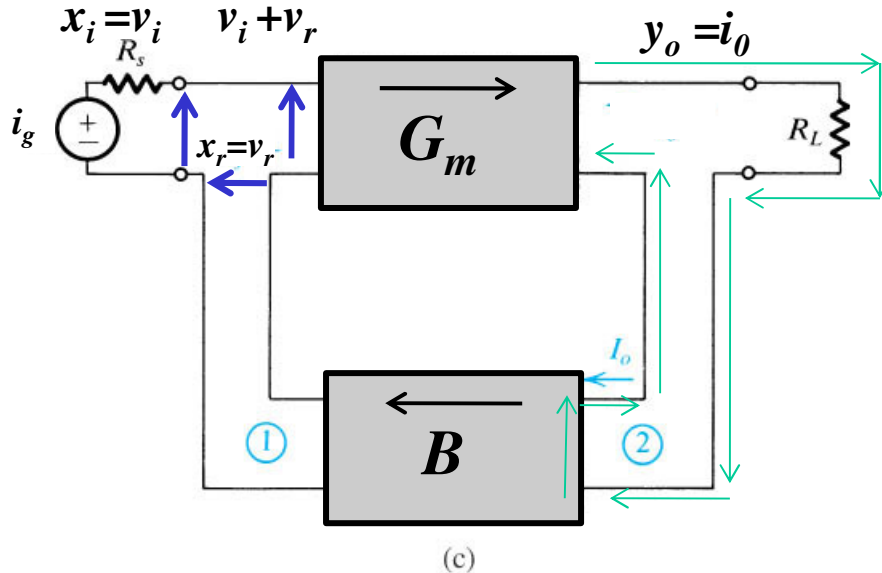
## a) Paralelna naponska





# 1. Tipovi realizacije NPS

## b) Redno strujna



$$G_{mr} = \frac{i_o}{v_i} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot B}$$

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

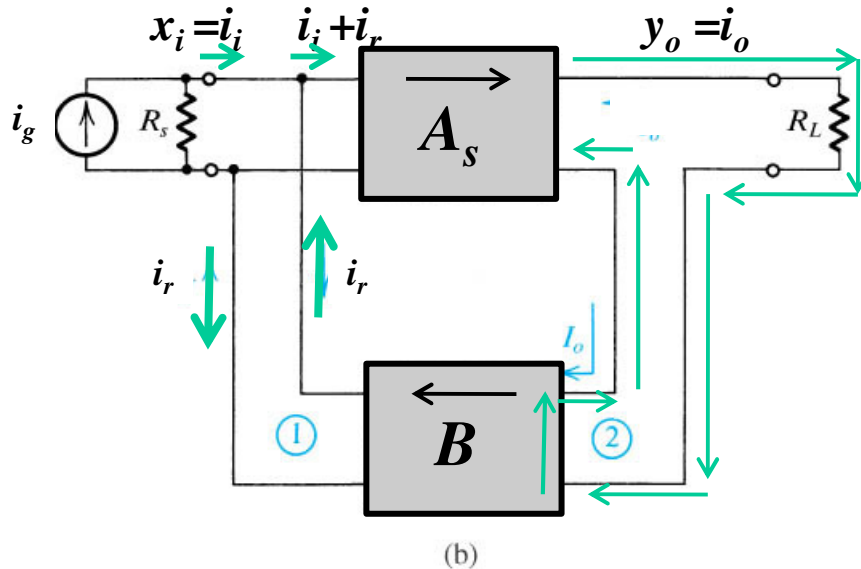
$$R_{or} = R_{oa} (1 - G_m B) > R_{ia}$$

Izlazna veličina je struja jer je signal koji se vraća preko kola povratne sprege srazmeran izlaznoj struji. Ulazna veličina je napon jer se na ulazu pojačavača napon reakcije oduzima od ulaznog napona.



# 1. Tipovi realizacije NPS

## c) Paralelno strujna



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

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

$< R_{ua}$

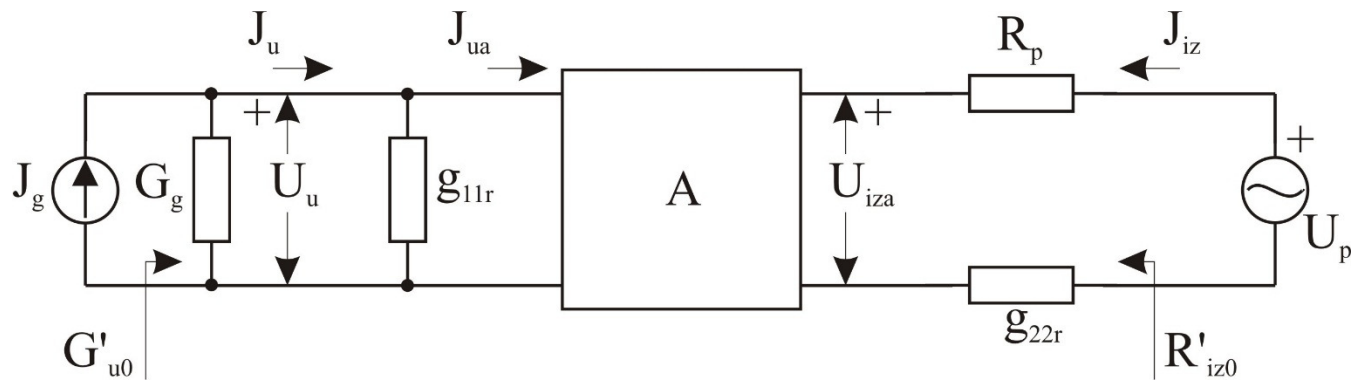
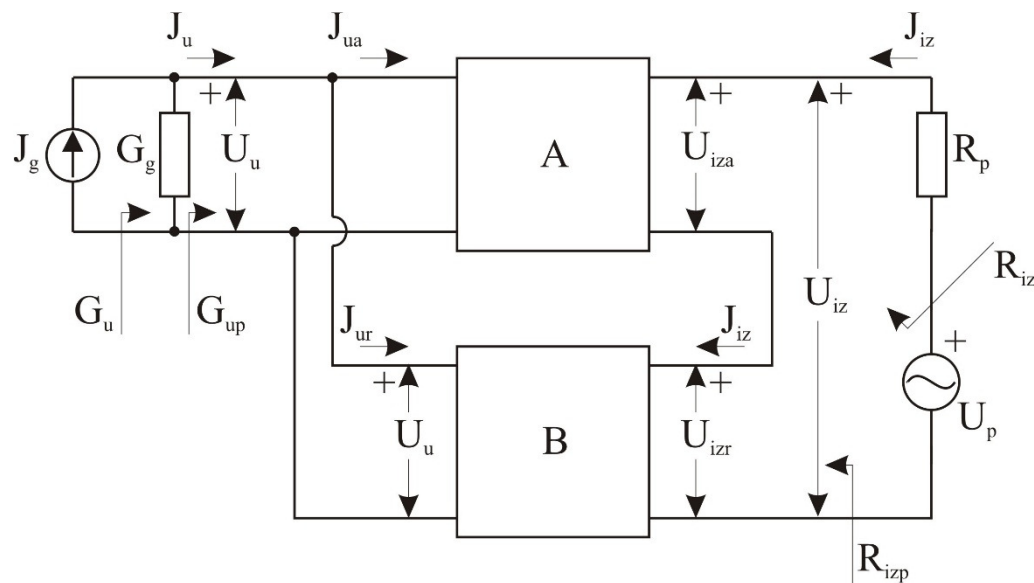
$$R_{or} = R_{oa} (1 - A_s B)$$

$> R_{ia}$

Izlazna veličina je struja jer je signal koji se vraća preko kola povratne sprege srazmeran struji. Ulazna veličina je struja jer se na ulazu pojačavača struja reakcije oduzima od ulazne struje.

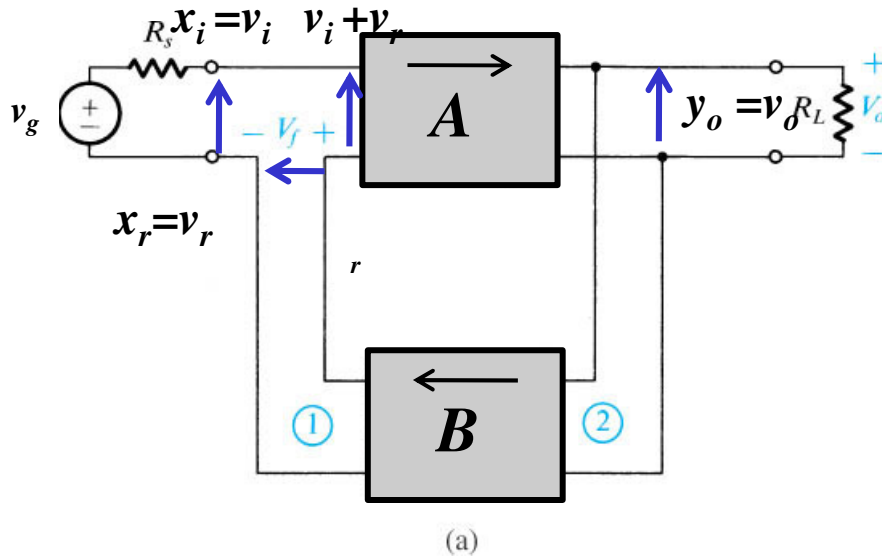
# 1. Tipovi realizacije NPS

## c) Paralelno strujna



# 1. Tipovi realizacije NPS

## d) Redno naponska



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

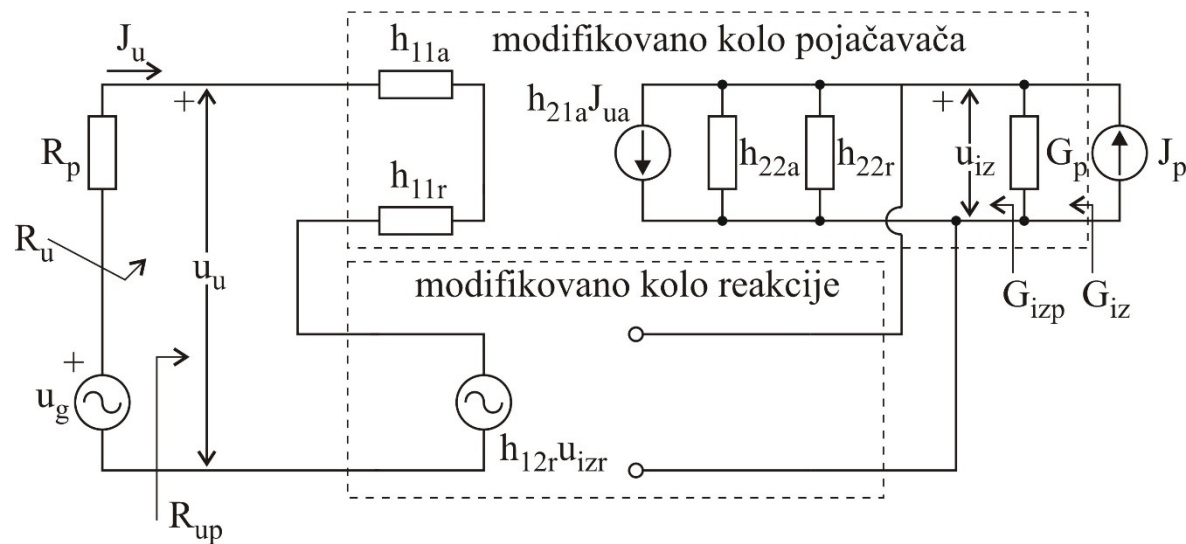
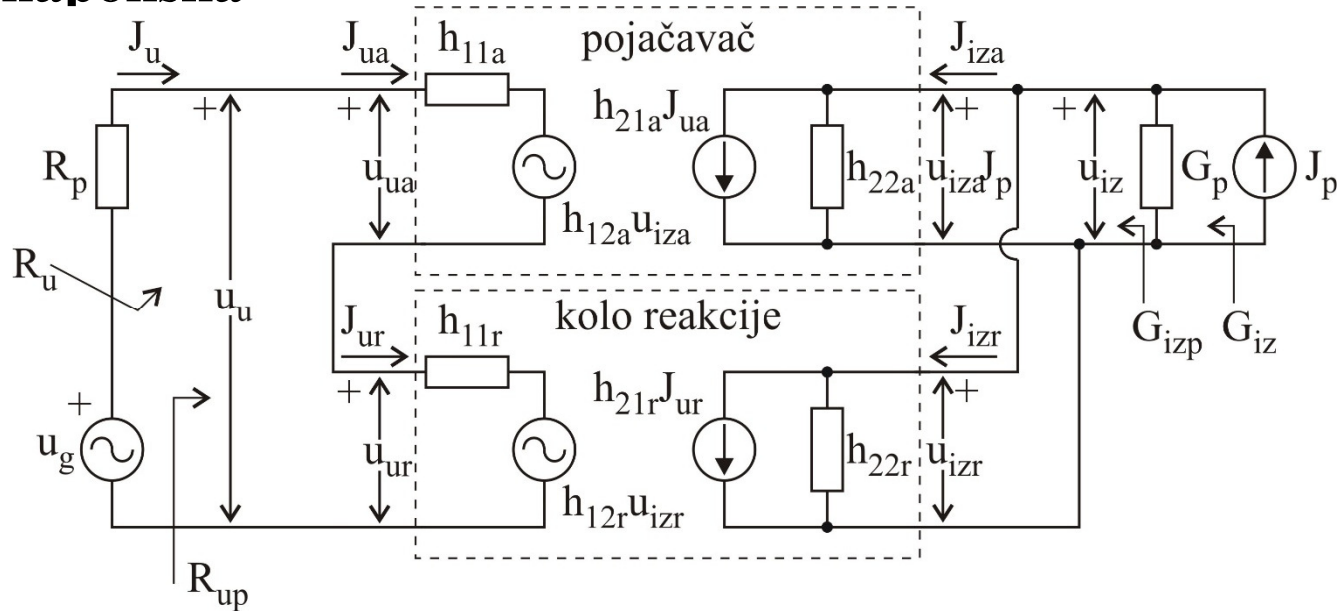
$$R_{ir} = R_{ia} (1 - AB) > R_{ua}$$

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

Izlazna veličina je napon jer je signal koji se vraća preko kola povratne sprege srazmeran naponu. Ulazna veličina je napon jer se na ulazu pojačavača napon reakcije oduzima od ulaznog napona.

# 1. Tipovi realizacije NPS

## d) Redno naponska



# NPS

---

## Analiza kola sa povratnom spregom preko kružnog pojačanja

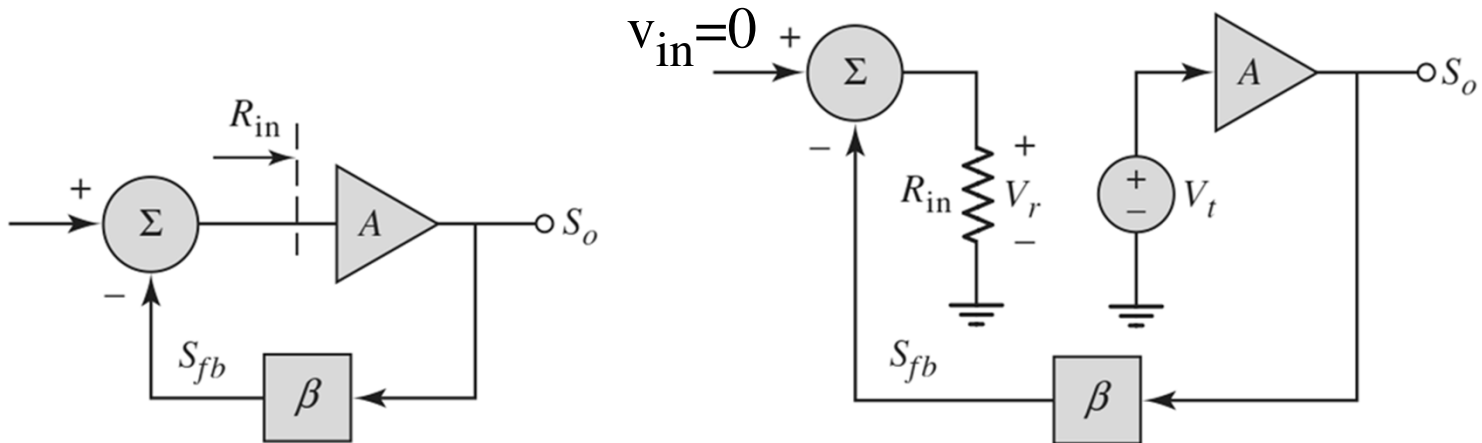
Postupak određivanja kružnog pojačanja sastoji se od sledećih tačaka:

- Prekinuti kolo povratne sprege u određenoj tački.
- Povezati test generator  $v_t$  na mestu prekida i u smeru toka signala .
- Izračunati impedansu koja se vidi sa krajeva test generator i priključiti izračunatu impedansu sa druge strane preseka.
- Ukinuti pobudne generatore.
- Kružno pojačanje je odnos napona na drugoj strani preseka,  $v_r$ , i napona test generatora,  $v_t$ .

$$AB = \frac{v_r}{v_t}$$

# NPS

## Analiza kola sa povratnom spregom preko kružnog pojačanja



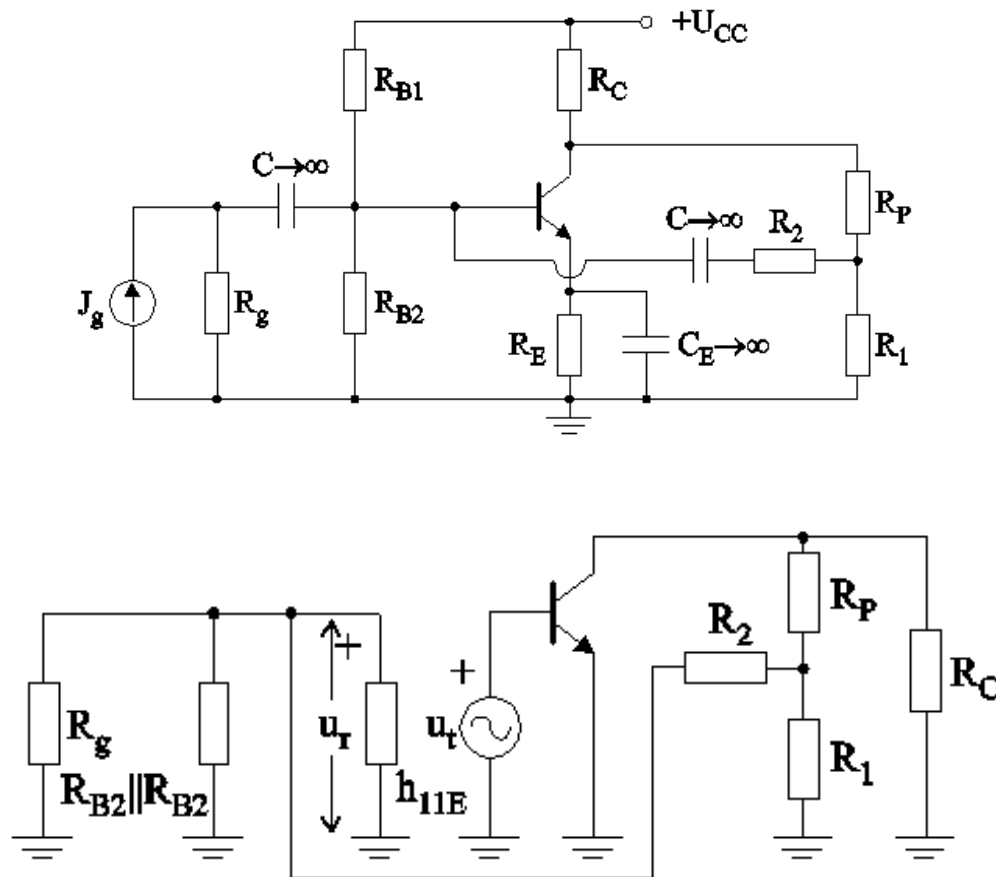
$$AB = \frac{v_r}{v_t}$$



# NPS

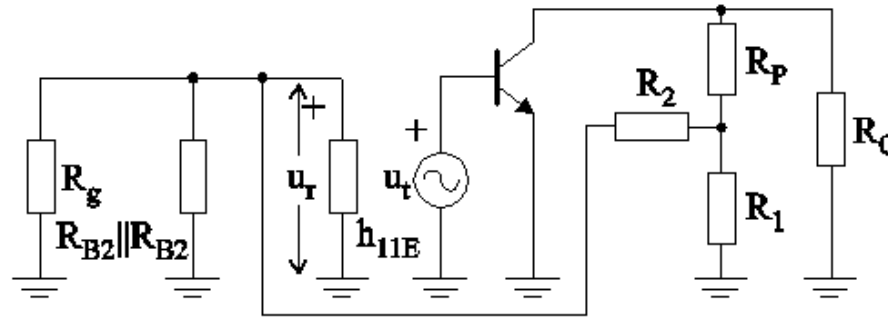
Odrediti kružno pojačanje pojačavače sa slike (Slika 1.10.1).

Poznato je:  $R_{B1} = R_{B2} \gg R_g = 2k\Omega$ ;  $R_C = 2k\Omega$ ;  $R_P = 1k\Omega$ ;  $R_1 = 2k\Omega$ ;  
 $R_2 = 1k\Omega$ ;  $h_{11E} = 2k\Omega$ ;  $h_{21E} = 200$ ;  $h_{12E} = 0$ ;  $h_{22E} = 0S$ .



# NPS

## Primer određivanja kružnog pojačanja



Slika 1.10.2

Ako uvedemo oznaku:

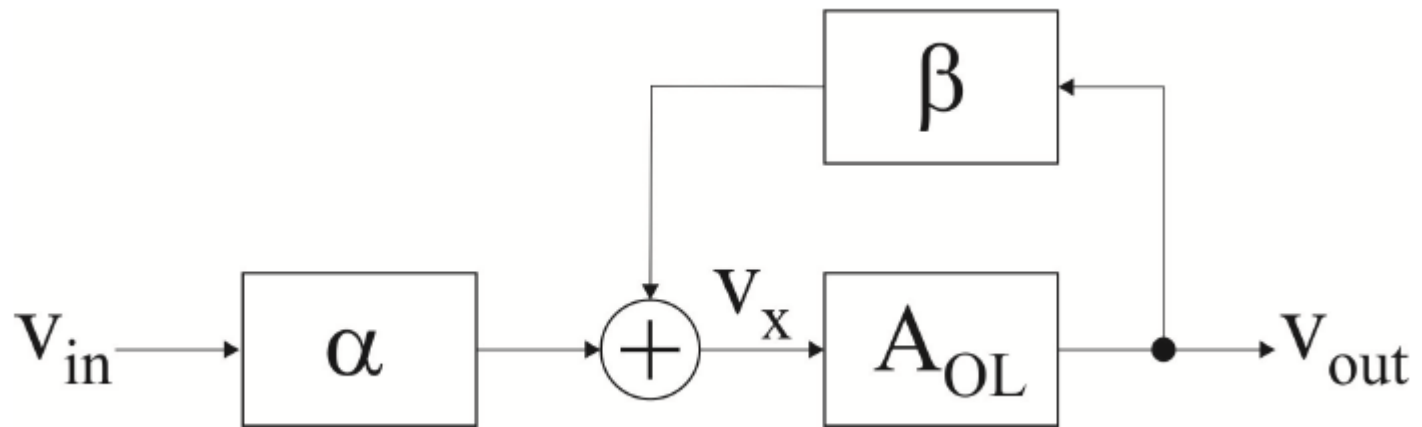
$$(1.10.1) \quad R_{EK} = R_C \parallel (R_P + (R_1 \parallel (R_2 + R_g \parallel h_{11E}))) = 1k\Omega$$

za kružno pojačanje se dobija:

$$(1.10.2) \quad \beta A = \frac{u_r}{u_t} = \frac{R_g \parallel h_{11E}}{R_g \parallel h_{11E} + R_2} \frac{(R_2 + R_g \parallel h_{11E}) \parallel R_1}{(R_2 + R_g \parallel h_{11E}) \parallel R_1 + R_P} \left( -\frac{h_{21E} R_{EK}}{h_{11E}} \right)$$

# NPS

## Analiza kola sa povratnom spregom preko kružnog pojačanja

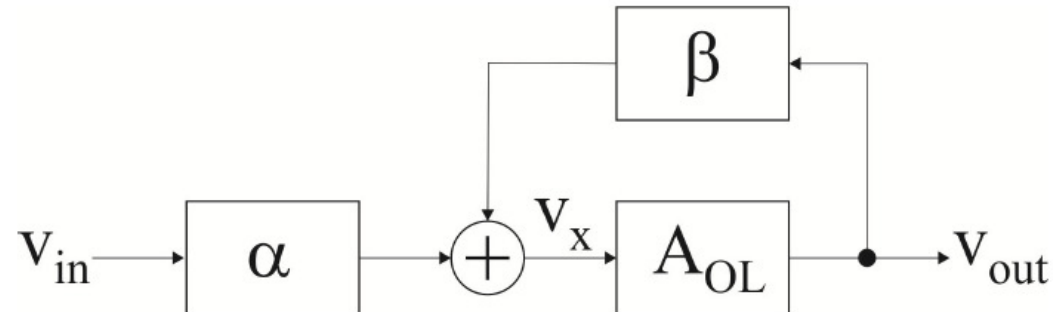


Na ulazu osnovnog pojačavača,  $A_{OL}$ , postoje dve komponente signala:

- Komponenta signala koja se prenosi direktno od ulaza celog kola do ulaza osnovnog pojačavača,  $\alpha V_{in}$ .
- Komponenta signala koja se vraća sa izlaza osnovnog pojačavača na ulaz osnovnog pojačavača,  $\beta V_{out}$ .

# NPS

## Analiza kola sa povratnom spregom preko kružnog pojačanja



Sledi da se napon na izlazu pojačavača sa povratnom spregom može izraziti kao:

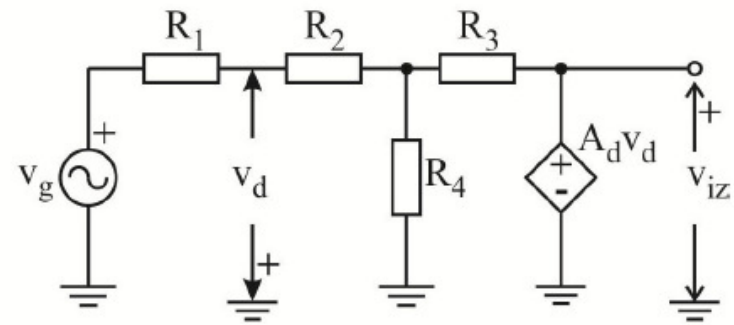
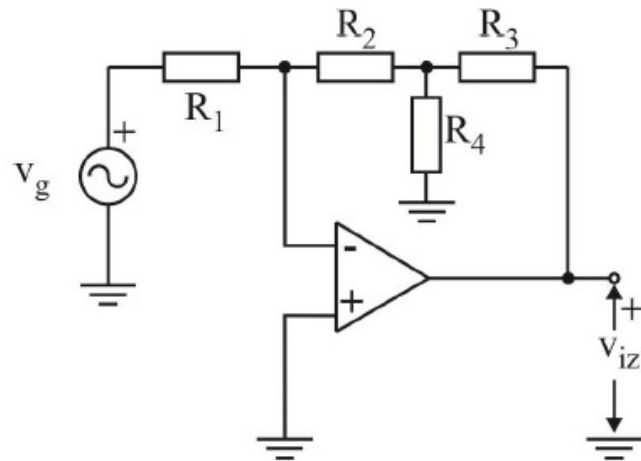
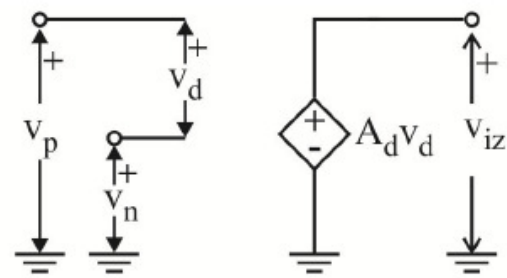
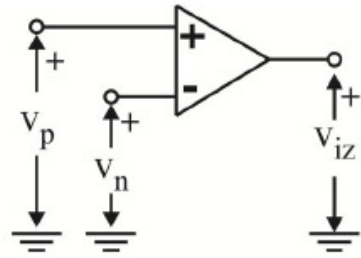
$$v_{out} = A_{OL} \cdot v_x = A_{OL} \cdot (\alpha \cdot v_{in} + \beta \cdot v_{out})$$

$$\text{gde je: } \alpha = \left. \frac{v_x}{v_{in}} \right|_{v_{out} = 0} \quad \beta = \left. \frac{v_x}{v_{out}} \right|_{v_{in} = 0}$$

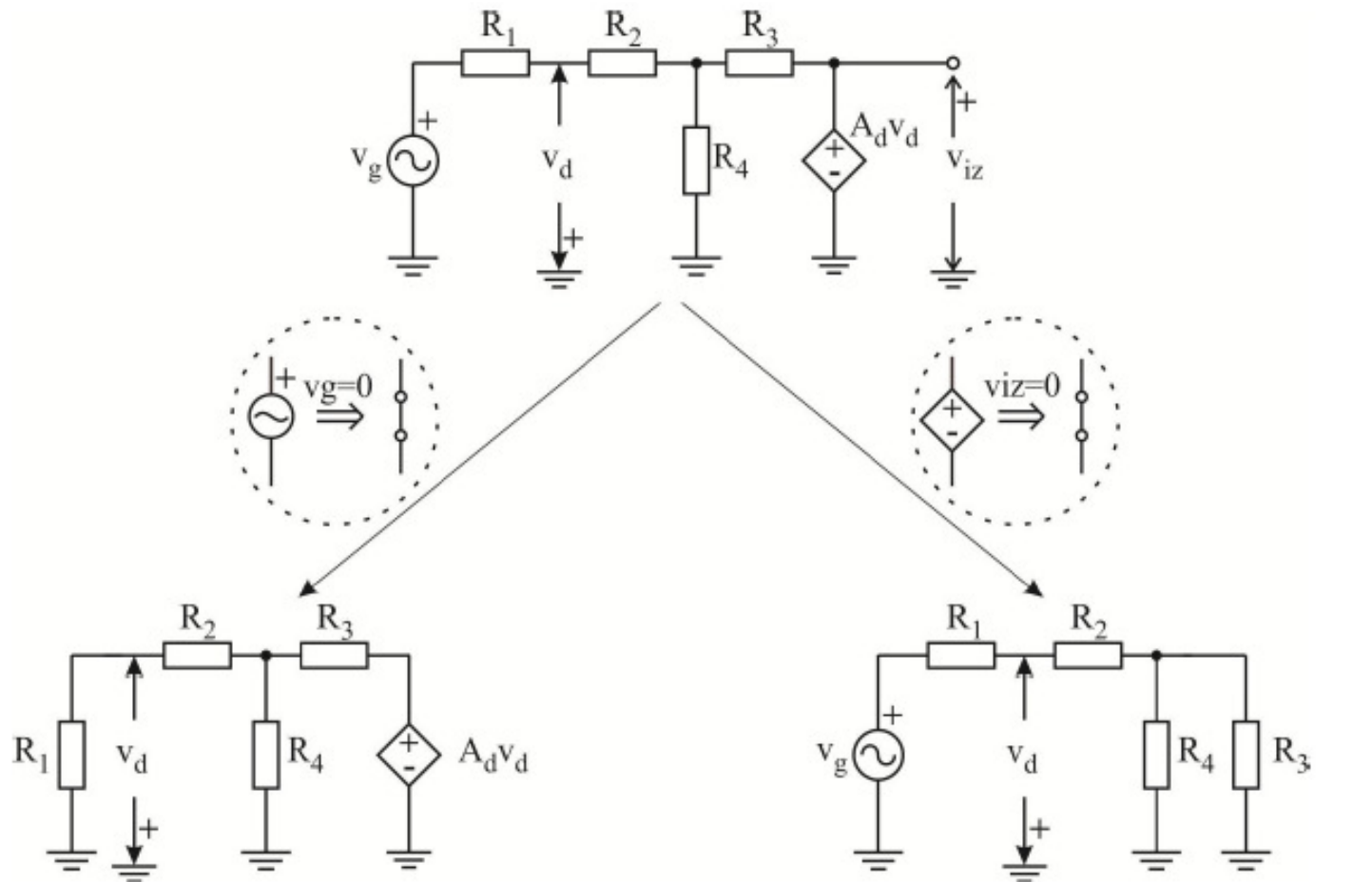
Naponsko pojačanje pojačavača sa povratnom spregom može se izraziti na sledeći način:

$$A_n = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\alpha \cdot A_{OL}}{1 - A_{OL} \cdot \beta}$$

# NPS



# NPS



$$\beta = -\frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4} = -9,7 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha = -\frac{R_2 + R_3 \parallel R_4}{R_1 + R_2 + R_3 \parallel R_4} = -0,5$$

$$v_d = \frac{v_{iz}}{A_d} = \alpha \cdot v_g + \beta \cdot v_{iz}$$

$$A_n = \frac{v_{iz}}{v_g} = \frac{\alpha \cdot A_d}{1 - A_d \cdot \beta} = -52$$

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	$x_i$	$y_o$	Pojačanje	Ulazna impedansa	Izlazna impedansa
redno naponska	$V_i$	$V_o$	$A_r = \frac{A}{1 - A \cdot B}$	$R_{ia}(1 - AB)$	$\frac{R_{oa}}{(1 - AB)}$
Redno strujna	$V_i$	$I_o$	$G_{mr} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot B}$	$R_{ia}(1 - G_m B)$	$R_{oa}(1 - G_m B)$
Paralelno naponska	$I_i$	$V_o$	$R_{mr} = \frac{R_m}{1 - R_m \cdot B}$	$\frac{R_{ia}}{(1 - R_m B)}$	$\frac{R_{oa}}{(1 - R_m B)}$
Paralelno strujna	$I_i$	$I_o$	$A_{sr} = \frac{A_s}{1 - A_s \cdot B}$	$\frac{R_{ia}}{(1 - A_s B)}$	$R_{oa}(1 - A_s B)$

\*Izrazi važe za idealne pojačavače;

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

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

Pravila:

- Kod redne PS vrednosti otpornika u kolu povratne sprege treba da budu što manje da bi se efekat umanjenja napona na ulazu u pojačavač bio što manji.
- Kod paralelne PS birati što veće vrednosti otpornika u kolu povratne sprege da bi efekat umanjenja struje na ulazu u pojačavač bio što manji.

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

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

# **Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom**

## Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

---

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

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

Kad postoji povratna sprega, postoji mogućnost da pri određenim uslovima ona postane pozitivna.

Na nekoj frekvenciji ( $\omega_{180}$ ) može da se desi da signal koji se vraća preko kola povratne sprege bude fazno pomeren u odnosu na ulazni signal za  $180^\circ$ . 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?

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

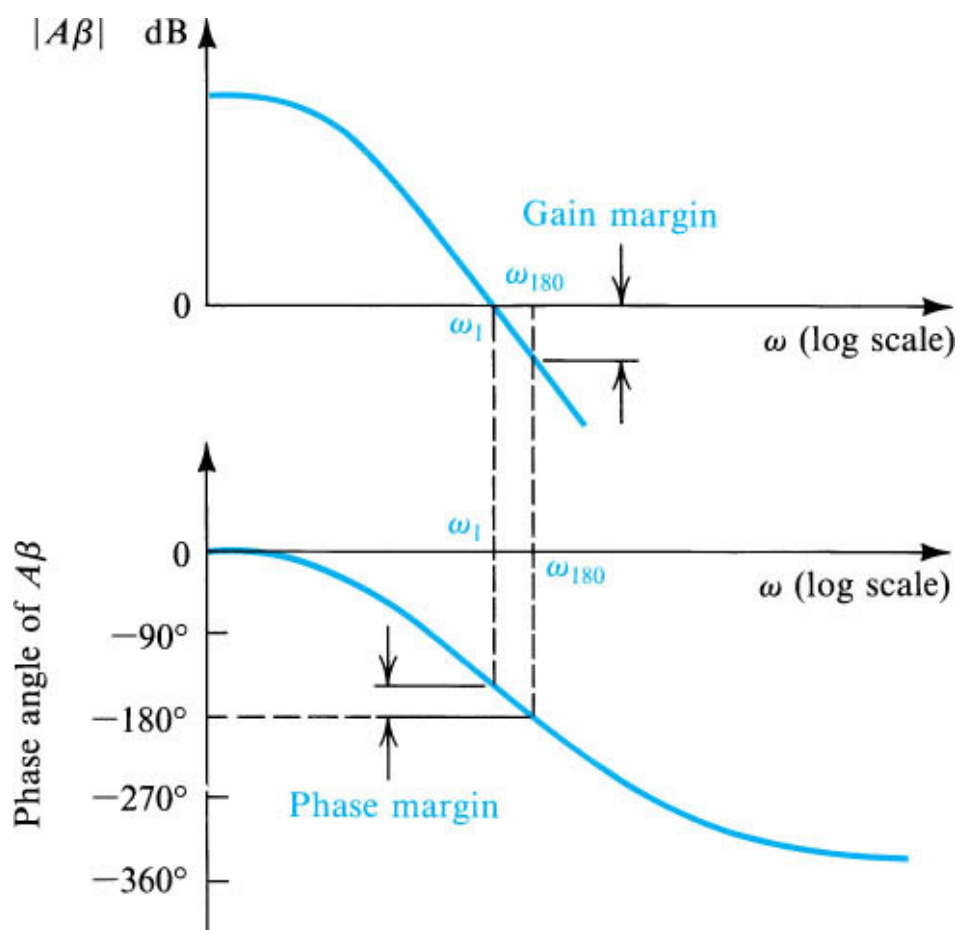
Ponašanje pojačavača u vremenskom domenu zavisi od frekvencijskih karakteristika, odnosno od položaja nula (frekvencije pri kojima je pojačanje=0) i polova (frekvencije pri kojima pojačanje  $\rightarrow \infty$ ) funkcije pojačanja.

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

# Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

## Kriterijum stabilnosti preko bodeovih dijagrama

Mera stabilnosti pojačavača sa povratnom spregom je **margin faze**, PM. Ona se određuje iz amplitudske i fazne karakteristike kružnog pojačanja  $T(j\omega)$ .



$$T(j\omega) = A(j\omega) \cdot B$$

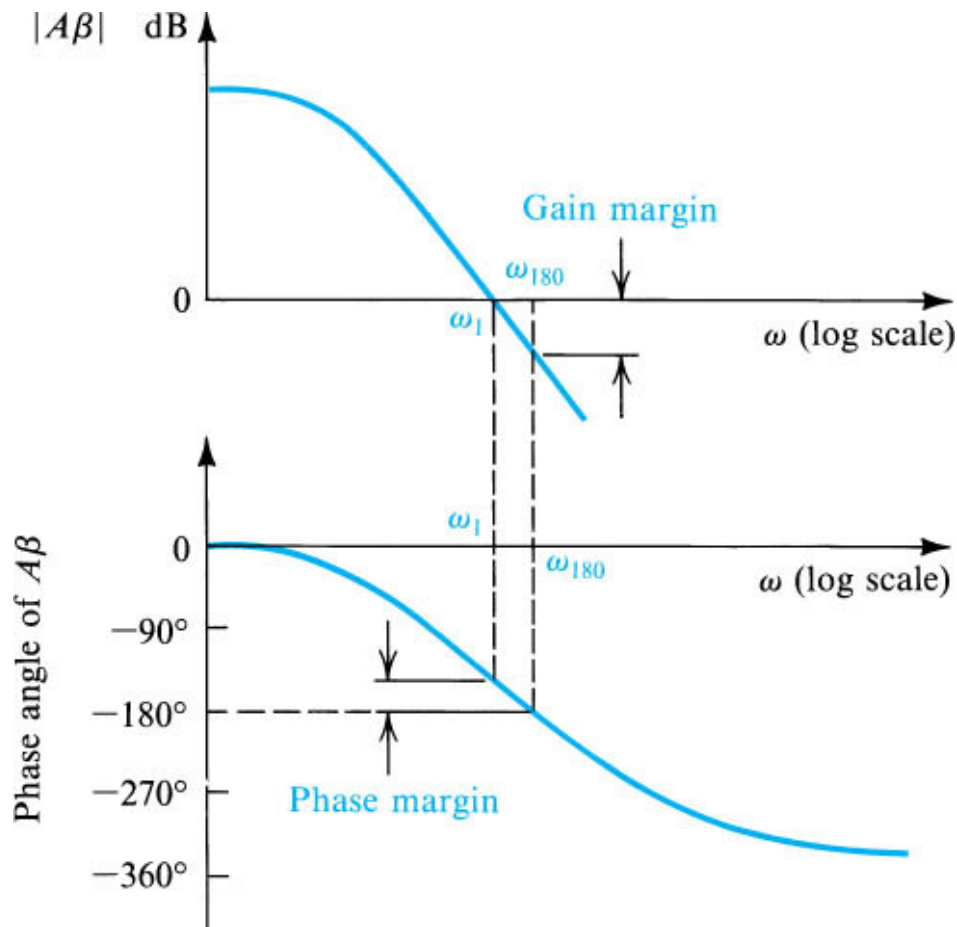
$$|T(j\omega_1)| = 1$$

$$PM = 180 + \arg\{T(j \cdot \omega_1)\}$$

Što je veća margina faze kolo je stabilnije.

# Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom

## Kriterijum stabilnosti preko bodeovih dijagrama



Druga mera stabilnosti pojačavača sa povratnom spregom je margina pojačanja, GM (Gain margin).

$$T(j\omega) = A(j\omega) \cdot B$$

$$\arg\{T(j \cdot \omega_{180})\} = \pi$$

$$GM = |T(j \cdot \omega_{180})|$$

Što je veća margina pojačanja kolo je stabilnije.



## Pojačavači sa negativnom povratnom spregom

### **Elementarna pitanja**

1. Struktura pojačavača sa povratnom spregom; Pojačanje pojačavača sa povratnom spregom.
2. Kružno pojačanje; Funkcija povratne sprege; Negativna i pozitivna povratna sprega.
3. Tipovi negativne povratne sprege (blok šema za svaki od četiri tipa).

### **Ostala ispitna pitanja**

4. Uticaj negativne povratne sprege na osetljivost (relativna osetljivost pojačanja na promene parametara osnovnog pojačavača i parametare kola povratne sprege).
5. Uticaj negativne povratne sprege na frekvencijsku karakteristiku (granične frekvencije, propusni opseg).
6. Postupak određivanja kružnog pojačanja kola sa povratnom spregom.
7. Objasniti uticaj negativne povratne sprege na šumove (odnos signal šum na primeru dvostepenog pojačavača).
8. Ulazna otpornost, izlazna otpornost i prenosna funkcija za redno-naponsku i paralelno-naponsku povratnu spregu.
9. Ulazna otpornost, izlazna otpornost i prenosna funkcija za redno-strujnu i redno-naponsku povratnu spregu.
10. Stabilnost pojačavača sa povratnom spregom. Definicija margine faze i margine pojačanja.