

# Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

	U JANUARU	OSTALO
Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (26.11.2016.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2017.)	50%	20%

120% 60%



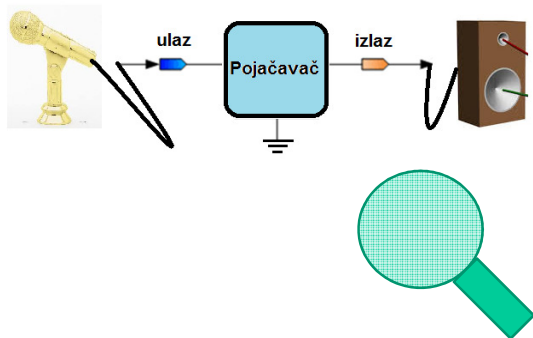
**Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA**

**Savet: Izadite na kolokvijum MNOOOOGO JE LAKŠE!**

# Jednostepeni MOSFET pojačavači

# Osnovi elektronike

**Najzad da vidimo od čega se sastoji, kako radi, kako se pravi pojačavač sa MOS tranzistorima?**



## Osnovne osobine MOS tranzistora

### Sadržaj:

#### 1. Uvod

Osnovne osobine MOS tranzistora

2. Pojačavač sa zajedničkim sorsom
3. Pojačavač sa zajedničkim gejtom
4. Pojačavač sa zajedničkim drejnom
5. Kaskodni pojačavači
6. Pojačavač sa CMOS parom
7. Pojačavač sa zajedničkim sorsom

**MOSFET – transkonduktanski pojačavač:**

• **Tranzistor radi u oblasti zasićenja:**

- $v_{GS} > V_t$ ;  $v_{DS} > v_{GS} - V_t$

$$i_D = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right)$$

$$i_D = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \approx A \cdot (v_{GS} - V_t)^2$$

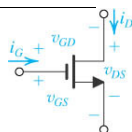
$$i_G = 0$$

- Napon  $v_{GS}$  kontroliše struju  $i_d = g_m v_{gs}$
- $i_d$  ne zavisi od  $R_D$  !!! Samo od  $v_{gs}$
- $i_G = 0, R_u \Rightarrow \infty$

• **Laka realizacija u IC**

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači



1. Pojačavač sa zajedničkim sorsom
2. Pojačavač sa zajedničkom gejtom
3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom

Važi za SVE konfiguracije:

Princip rada - Tranzistor u **ZASIĆENJU**

DC polarizacija – obezbeđuje rad u **ZASIĆENJU**

Odnosi snaga – troši energiju i u odsustvu signala

Analiza za male signale na SF (ravna amplitudska)

Pojačanje?

Ulazna otpornost?

Izlazna otpornost?

Ponašanje na niskim frekvencijama, NF

Ponašanje na visokim frekvencijama, VF

29. novembar 2016.

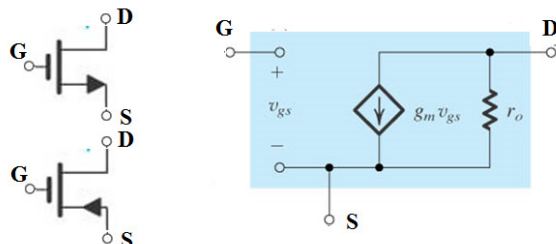
Jednostepeni pojačavači sa BJT

Važi za SVE konfiguracije:

Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

a) Zamenimo sve poluprovodničke komponente dinamičkim modelima



29. novembar 2016.

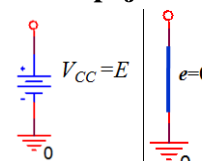
Jednostepeni pojačavači sa BJT

Važi za SVE konfiguracije:

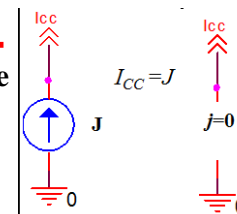
Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

b) Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona



c) Uklonimo DC izvore konstantne struje



29. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

## Sadržaj

Važi za SVE konfiguracije:

Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

d) U el. šemi ostaju svi elementi neophodni za DC polarizaciju tranzistora

B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost

29. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

9

## Sadržaj

Važi za SVE konfiguracije:

Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

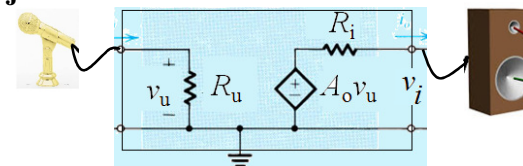
B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost

C) Pojačavač u kolu zamenimo modelom



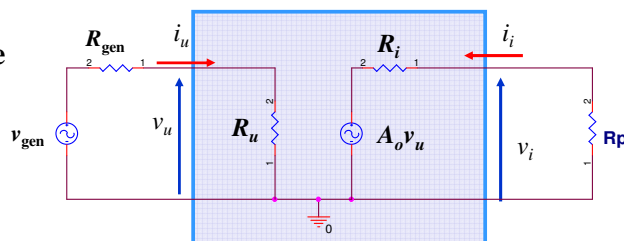
29. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

10

## Analiza za male signal

Odredimo  
ukupno pojačanje



$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}}$$

$$v_i = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_0 v_u \Rightarrow \frac{v_i}{v_u} = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_0$$

$$v_u = \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} v_{gen} \Rightarrow \frac{v_u}{v_{gen}} = \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} \frac{v_u}{v_{gen}} = \left( \frac{R_p}{R_p + R_i} A_0 \right) \left( \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} \right)$$

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

11

## Jednostepeni pojačavači sa MOST

1. Pojačavač sa zajedničkim sorsom
2. Pojačavač sa zajedničkim gejtom
3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom
4. Kaskodni pojačavači
5. Pojačavač sa CMOS parom

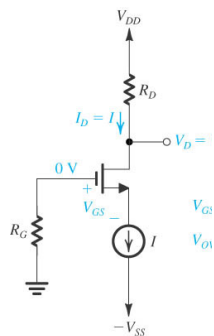
29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

12

### 1. Pojačavač sa zajedničkim sorsom

- a. Princip rada
- b. DC polarizacija
- c. Odnosi snaga
- d. Stabilnost
- e. Analiza za male signale
  - i. Ulazna otpornost beskonačna
  - ii. Pojačanje neopterećenog pojačavača?
  - iii. Izlazna otpornost?
- f. Analiza u frekvencijskom domenu



### a) Princip rada:

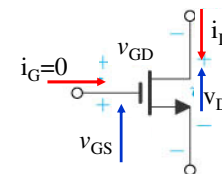
- **Tranzistor radi u konfiguraciji ZS**

Ulaz =>  $v_{GS}$  pobuda u kolu gejta

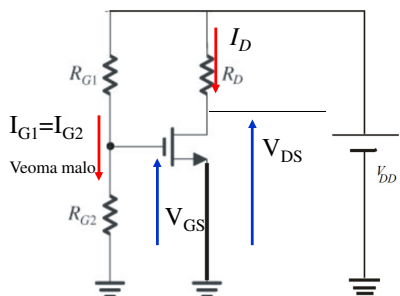
Izlaz =>  $i_D, v_{DS}$  potrošač u kolu drejna

$$i_D = i_S$$

- **Tranzistor radi u oblasti zasićenja**
- **Pojačava male signale (u okolini radne tačke)**
- **Obrće fazu**
- **Pojačavač napona**



### b) DC polarizacija



Obezbediti rad u oblasti zasićenja:

$$V_{GS} > V_t; V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$I_G = 0$$

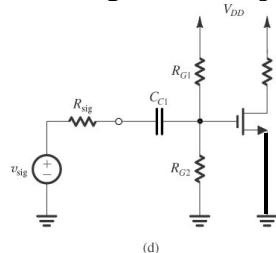
$$V_{GS} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD}$$

$$I_D = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = A \cdot V_{OV}^2$$

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$$

### b) DC polarizacija



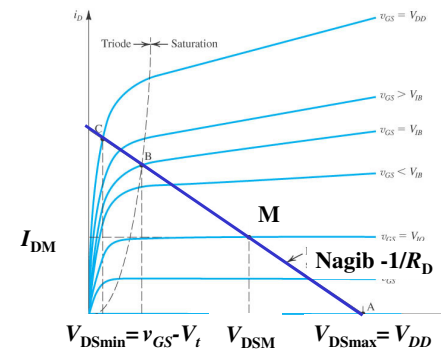
Obezbediti rad u oblasti zasićenja:

$$v_{GS} > V_t; v_{DS} > v_{GS} - V_t$$

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$$

Radna prava

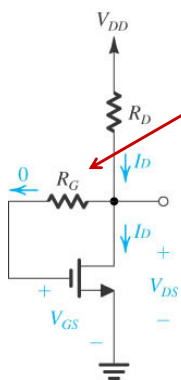
$$V_{DSM} = V_{DD}/2$$



Dinamički opseg izlaznog napona

$$v_{DS}$$

b) DC polarizacija - otpornik G-D



$V_{GS} = V_{DS}$ ,

Zašto?

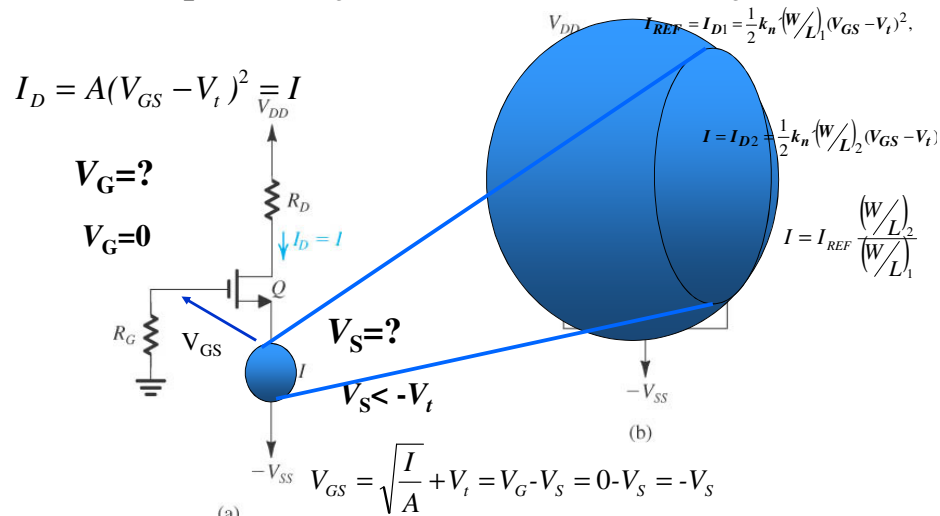


Šta to znači?

Tranzistor uvek u zasićenju,

$V_{DS} = V_{GS} > V_{GS} - V_t$

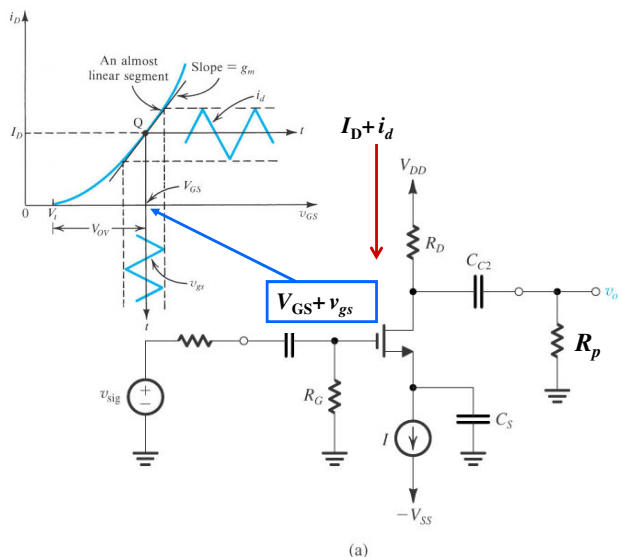
b) DC polarizacija - izvor konstantne struje



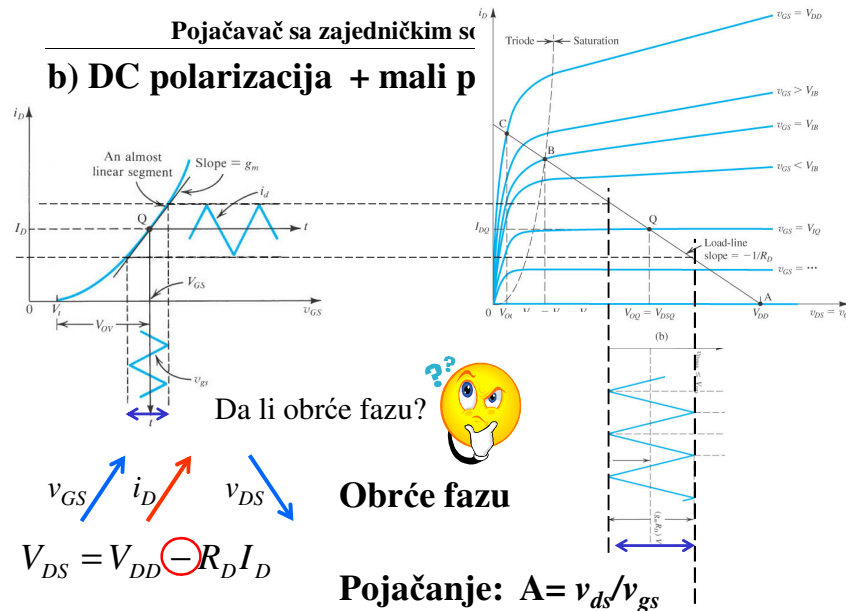
29. novobar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

b) DC polarizacija + mali pobudni signal  $v_{gs}$

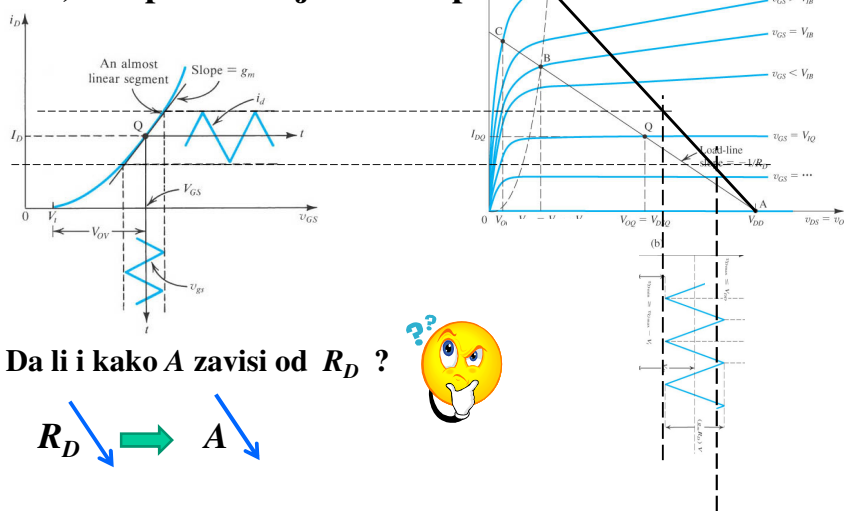


b) DC polarizacija + mali p



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b) DC polarizacija + mali p

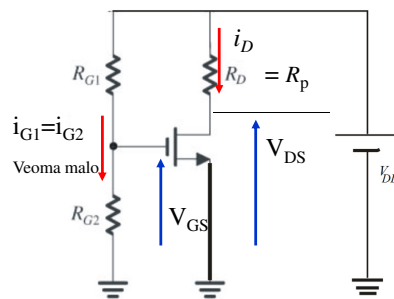


Da li i kako A zavisi od  $R_D$  ?



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj

Trenutna snaga na  $R_D$

$$P_{R_p} = R_p i_D^2 = R_p (I_{DM} + i_d)^2$$

$$P_{R_p} = R_p I_{DM}^2 + R_p i_d^2 + 2R_p i_d I_{DM}$$

Srednja snaga na  $R_D$

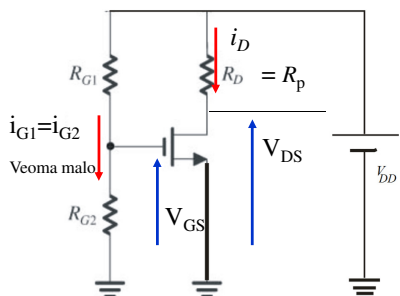
$$P_{R_p} = R_p I_{DM}^2 + R_p I_{Deff}^2$$

Prvi član odgovara struji u mirnoj radnoj tački (DC), a drugi potiče od efektivne vrednosti struje kroz  $R_D$ .

$$P_{R_p \min} = P_{R_p} \Big|_{i_d=0} = R_p I_{DM}^2$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj

Trenutna snaga na tranzistoru

$$P_T = v_{DS} i_D + v_{GS} i_G \stackrel{0}{=} v_{DS} i_D$$

$$P_T = (V_{DD} - R_p i_D) i_D = V_{DD} i_D - R_p i_D^2$$

Srednja snaga na tranzistoru

$$P_T = P_d = P_{DD} - P_{R_p}$$

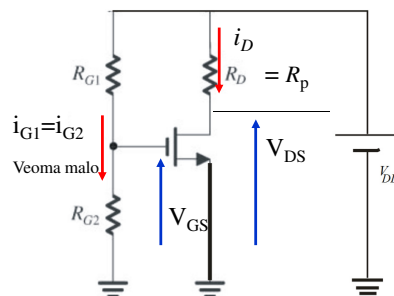
Na tranzistoru se troši najveća snaga u odsustvu signala

$$P_{T \max} = P_{DD} - P_{R_p \min} = P_{DD} - R_p I_{DM}^2 = V_{DD} I_{DM} - R_p I_{DM}^2$$

$$P_{T \max} = (V_{DD} - R_p I_{DM}) I_{DM} = V_{DSM} I_{DM}$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj

Stepen iskorišćenja u odsustvu signala

$$\eta = \frac{P_{R_p}}{P_{DD}} = \frac{P_{DD} - P_d}{P_{DD}}$$

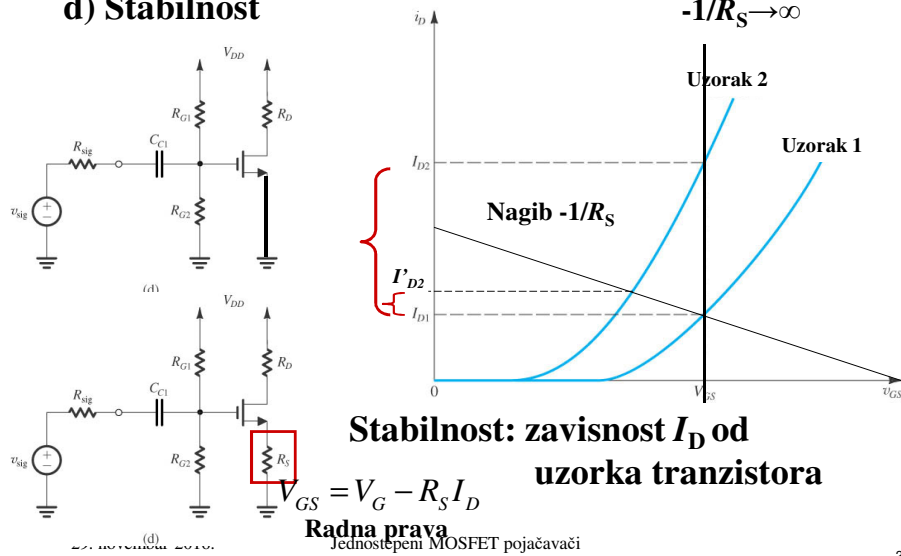
$$\eta = \frac{V_{DD} I_{DM} - V_{DM} I_{DM}}{V_{DD} I_{DM}}$$

$$\eta = \frac{V_{DD} - V_{DM}}{V_{CC}} = 1 - \frac{V_{DM}}{V_{DD}}$$

za  $V_{DM} = V_{DD}/2$

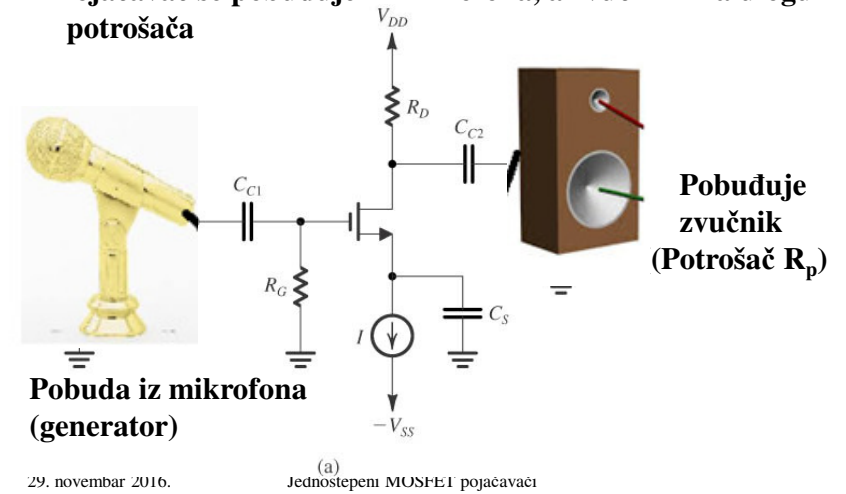
$$\eta = 50\%$$

d) Stabilnost



e) Analiza za male signale:

Pojačavač se pobuđuje iz mikrofona, a zvučnik ima ulogu potrošača



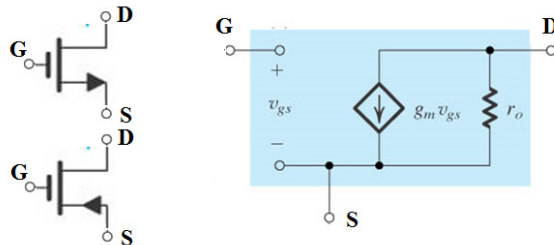
Sadržaj

Važi za SVE konfiguracije:

Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

a) Zamenimo sve poluprovodničke komponente dinamičkim modelima



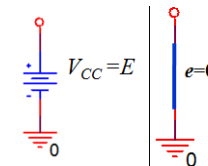
Sadržaj

Važi za SVE konfiguracije:

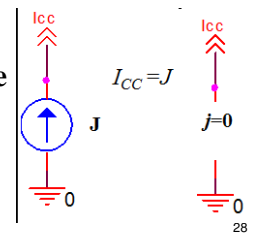
Postupak AC analize (za male signale):

A) Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente)

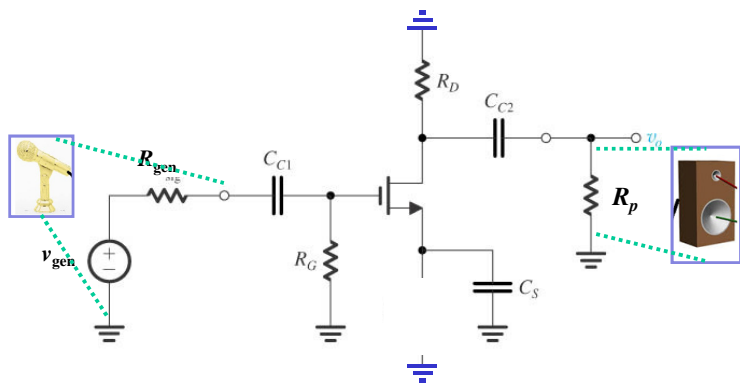
b) Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona



c) Uklonimo DC izvore konstantne struje



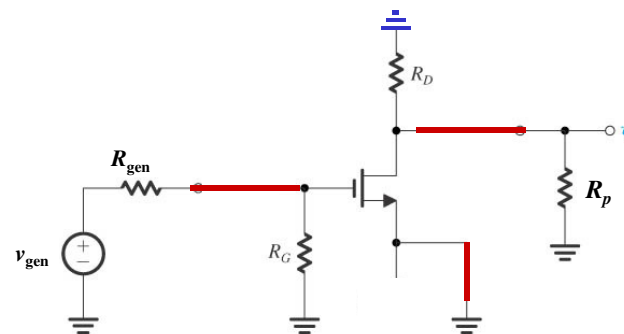
e) Analiza za male signale: zamena dinamičkim modelima  
 $V_{DD}$  i  $V_{EE}$  - kratak spoj;  $I$  – beskonačna otpornost=prekid



29. novembar 2016.

(a) Jednostepeni MOSFET pojačavači

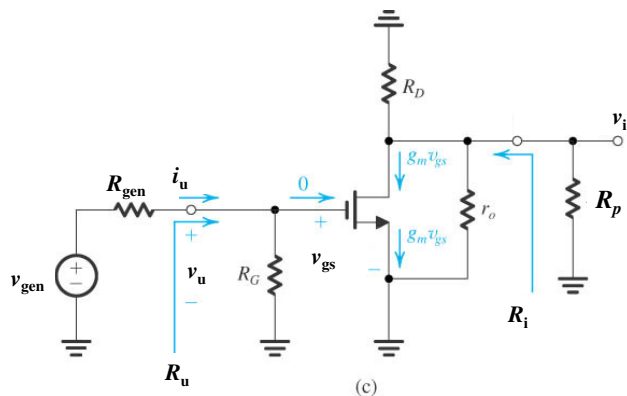
e) Analiza za male signale:  $C_S$  i  $C_{S1,2}$  kratak spoj



29. novembar 2016.

(a) Jednostepeni MOSFET pojačavači

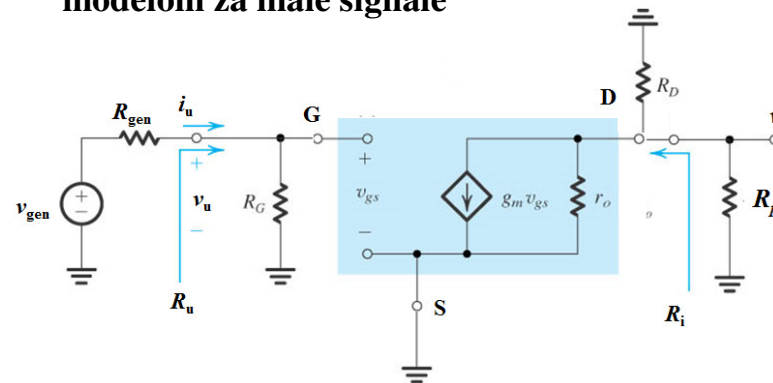
e) Analiza za male signale  
 Ekvivalentna šema



29. novembar 2016.

(c) Jednostepeni MOSFET pojačavači

e) Analiza za male signale  
 Ekvivalentna šema – tranzistor zamenjen modelom za male signale

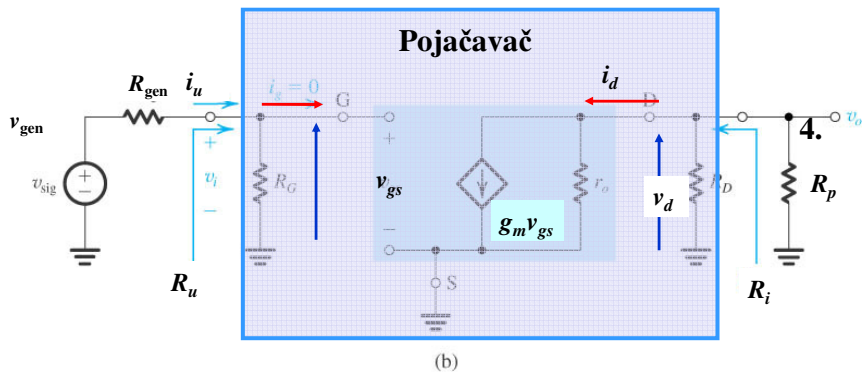


29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači



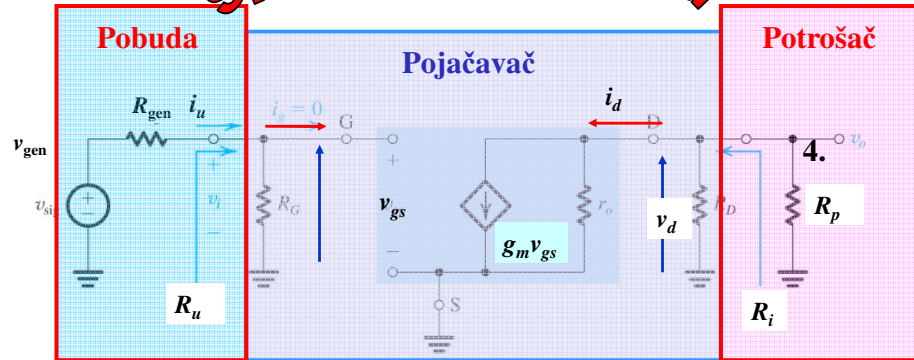
e) Analiza za male signale:  
Svi elementi neophodni za DC polarizaciju tranzistora ulaze u kolo pojačavača



(b)

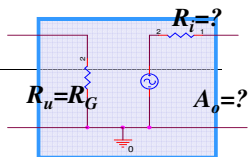
e) Analiza za male signale:

**Spoljašnji elementi**



(b)

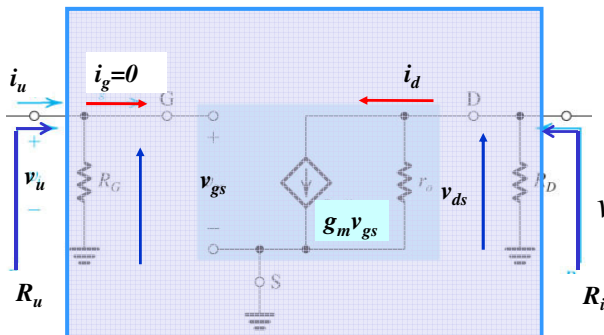
e) Analiza za male signale



$$A_0 = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty}$$

$$v_i = v_{ds} = -i_d (r_o \parallel R_D)$$

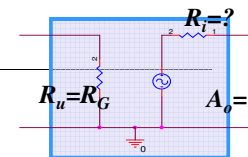
Obrće fazu



(b)

$$v_i = v_{ds} = -g_m v_{gs} (r_o \parallel R_D) \approx -g_m v_{gs} R_D$$

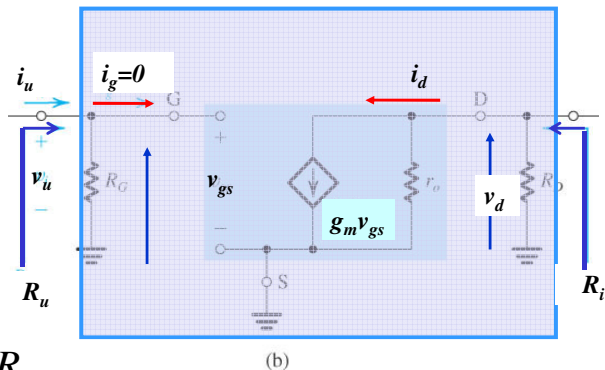
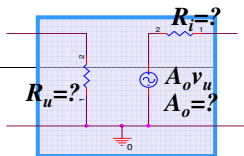
e) Analiza za male signale



$$A_0 = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = -g_m (r_o \parallel R_D) \quad \boxed{A_0 \approx -g_m R_D \text{ za } r_o \gg R_D}$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale

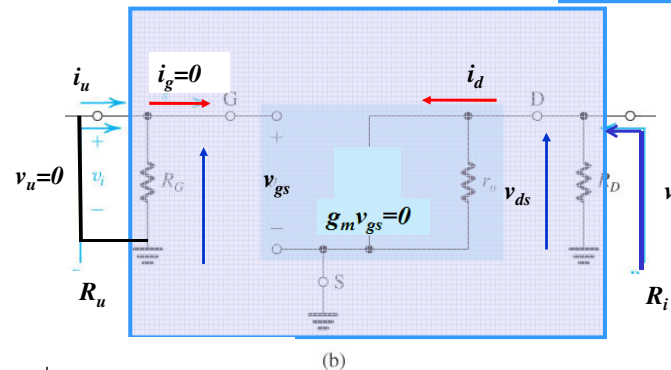
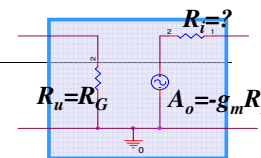


$$R_u = R_G$$

(b)

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



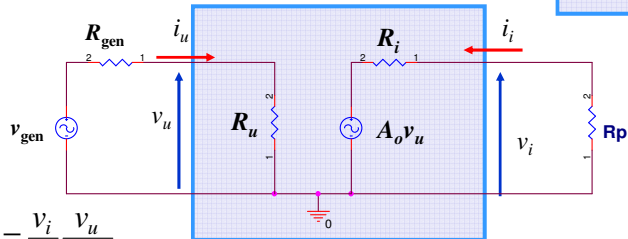
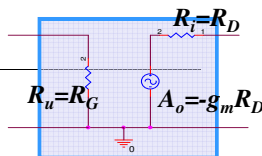
$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0} = (r_o \parallel R_D)$$

$$R_i \approx R_D \text{ za } r_o \gg R_D$$

(b)

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



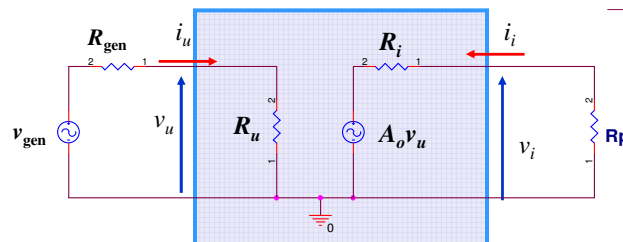
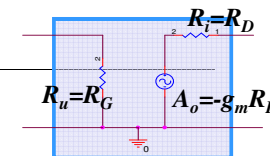
$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}}$$

$$v_i = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_o v_u \Rightarrow \frac{v_i}{v_u} = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_o$$

$$v_u = \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} v_{gen} \Rightarrow \frac{v_u}{v_{gen}} = \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



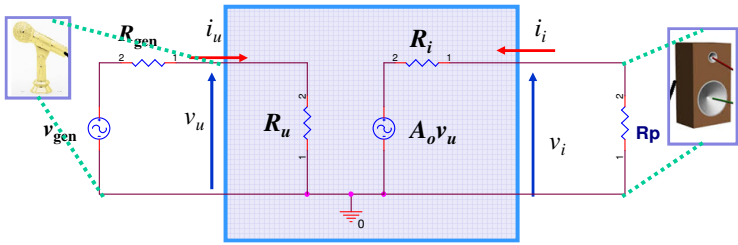
$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}} = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_o \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{R_p}{R_p + R_D} (-g_m R_D) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} \Big|_{R_G \gg R_{gen}} \approx -\frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m$$

$$A_u \approx -\frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m = -g_m (R_p \parallel R_D)$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



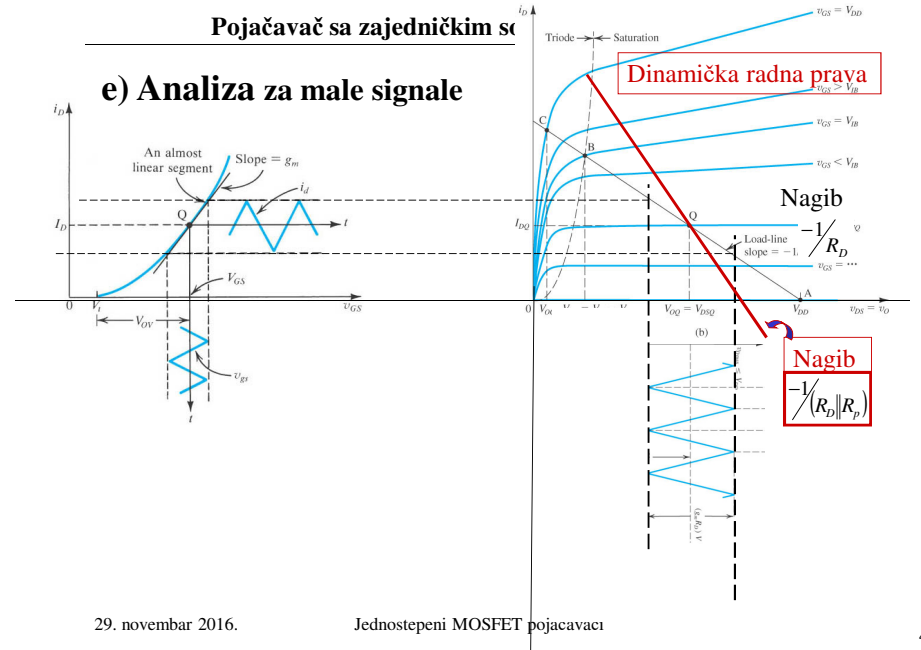
Za slučaj da je  $R_G=10\text{M}\Omega$ ,  $R_D=2\text{k}\Omega$ ,  $g_m=10\text{mS}$  ( $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$ )

$$A_u = -\frac{R_p g_m R_D}{R_p + R_D} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} \approx -\frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m$$

$$A_u \approx -\frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m = -g_m (R_p \parallel R_D) \approx -10 \cdot 10^{-3} \cdot 8 = -0.08$$

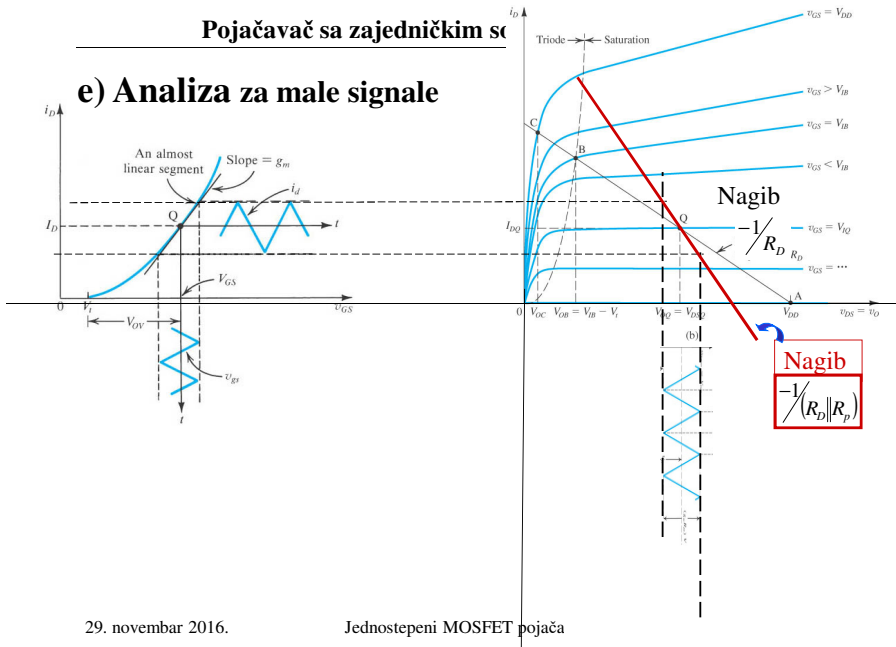
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



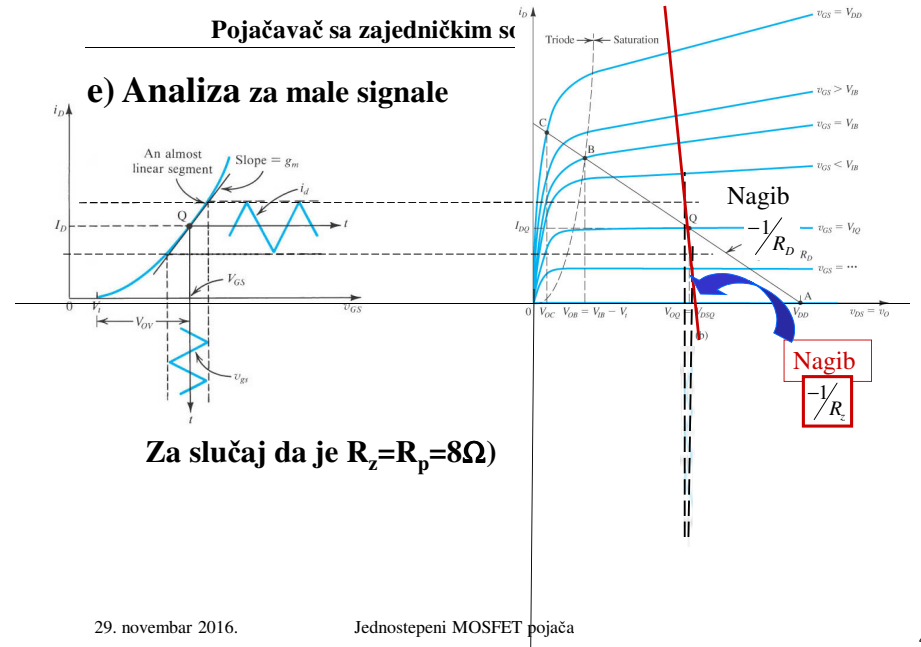
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



Za slučaj da je  $R_z=R_p=8\Omega$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

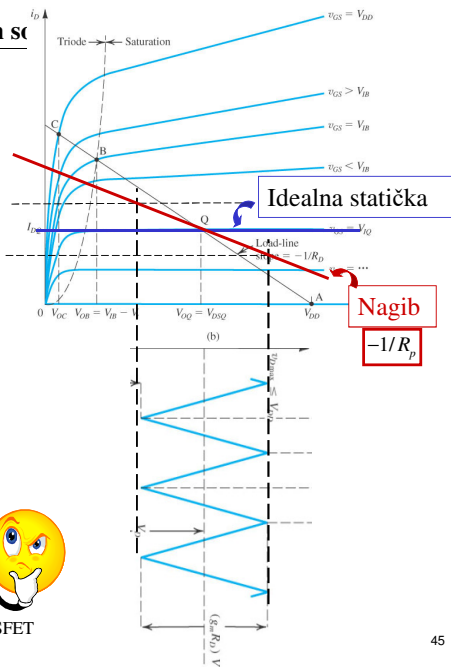
e) Analiza za male signale

Pojačanje će biti veće ukoliko je  $R_D$  veće.

Idealno bi bilo  $R_D \rightarrow \infty$  (samo  $R_p$  određuje pojačanje).

Međutim, tada je u kolu prekid i neće teći DC struja.

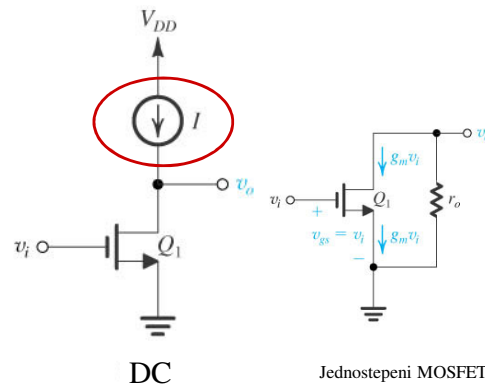
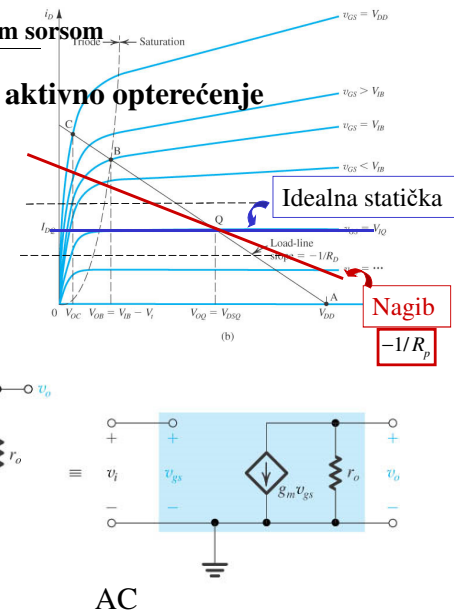
Koji je to element koji propušta DC a ima beskonačnu dinamičku otpornost?



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale – aktivno opterećenje

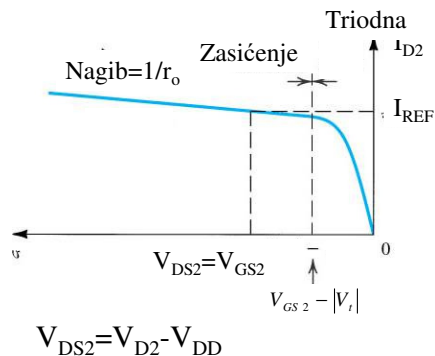
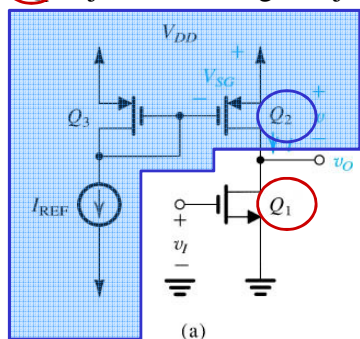
Koji je to element koji propušta DC a ima beskonačnu dinamičku otpornost?



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale – aktivno opterećenje

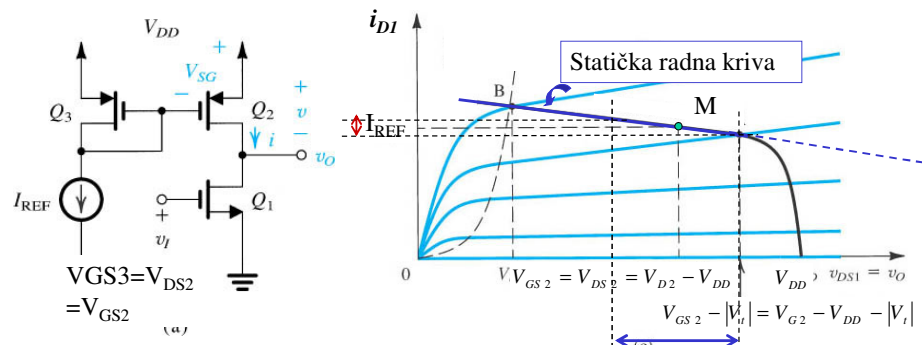
Ovo se lako implementira u CMOS tehnologiji preko pMOS tranzistora  $Q_2$  koji predstavlja dinamičko opterećenje tranzistora  $Q_1$  koji radi u konfiguraciji ZS



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale – aktivno opterećenje

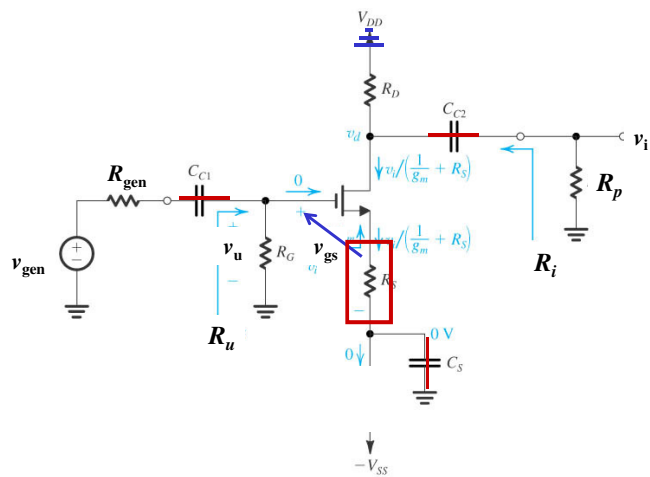
pMOS kao aktivno opterećenje



Male promene struje  $i_D \Rightarrow$  velike promene napona  $v_{DS}$

Znači i male promene napona  $v_{GS} \Rightarrow$  velike promene napona  $v_{DS}$

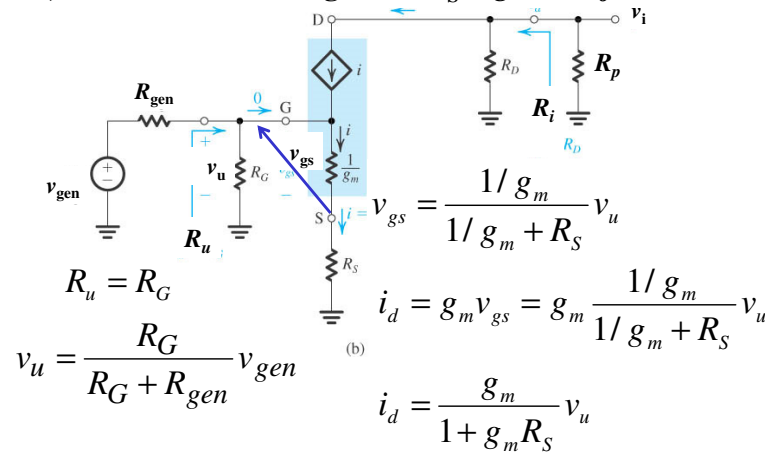
e) Analiza za male signale –  $R_S$  degeneracija u sorsu



29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

e) Analiza za male signale –  $R_S$  degeneracija u sorsu



$$v_{gs} = \frac{1/g_m}{1/g_m + R_S} v_u$$

$$i_d = g_m v_{gs} = g_m \frac{1/g_m}{1/g_m + R_S} v_u$$

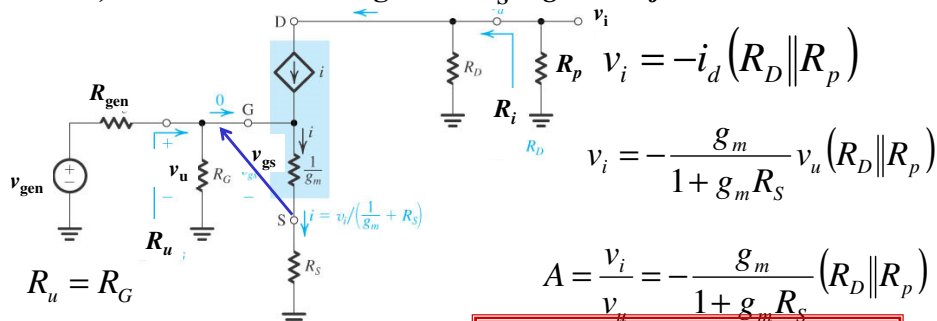
$$v_u = \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} v_{gen}$$

$$i_d = \frac{g_m}{1 + g_m R_S} v_u$$

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

e) Analiza za male signale –  $R_S$  degeneracija u sorsu



$$v_i = -i_d (R_D || R_p)$$

$$v_i = -\frac{g_m}{1 + g_m R_S} v_u (R_D || R_p)$$

$$A = \frac{v_i}{v_u} = -\frac{g_m}{1 + g_m R_S} (R_D || R_p)$$

$$R_u = R_G$$

$$v_u = \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} v_{gen}$$

$$A_0 = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$

Koliko je  $A_0$  za  $R_S=0$ ??



29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

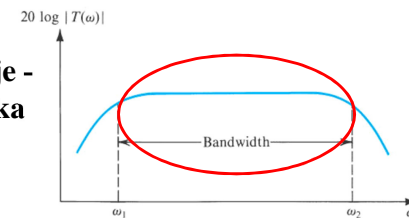
f) Analiza u frekvencijskom domenu

Prethodna analiza:

- Reaktanse svih kondenzatora zanemarene

Rezultat:

- Pojačanje ne zavisi od frekvencije - Ravna amplitudska karakteristika
- Prihvatljivo samo za frekvencije u popusnom opsegu



29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

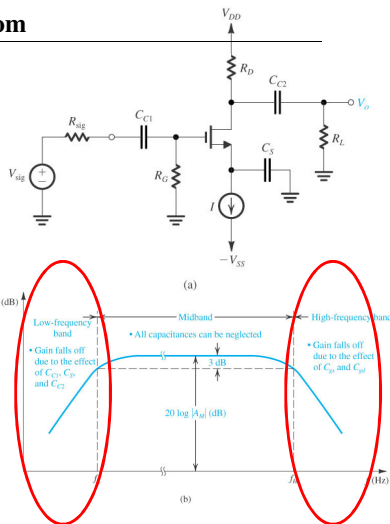
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

Realno kolo:

Reaktanse kondenzatora konačne

- Na NF  $C_S$  i  $C_C$  predstavljaju konačne impedanse
- $C_C$  blokiraju (oslabi) NF signal
- $C_S$  ponaša se kao impedansa u sorsu – smanjuje pojačanje
- Na VF  $C_{gd}$  i  $C_{gs}$  dolaze do izražaja
- $C_{gd}$  kratkospaja G i D tranzistora
- $C_{gs}$  kratkospaja G za S (masu)

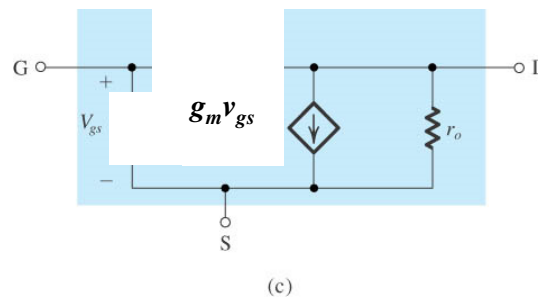


Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

NF

– u AC modelu uticaj  $C_{gd}$  i  $C_{gs}$  je zanemariv pri NF (reaktanse velike);



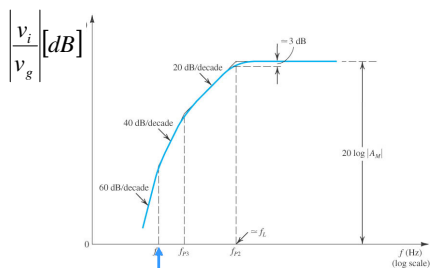
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

Informativno

f) Analiza u frekvencijskom domenu

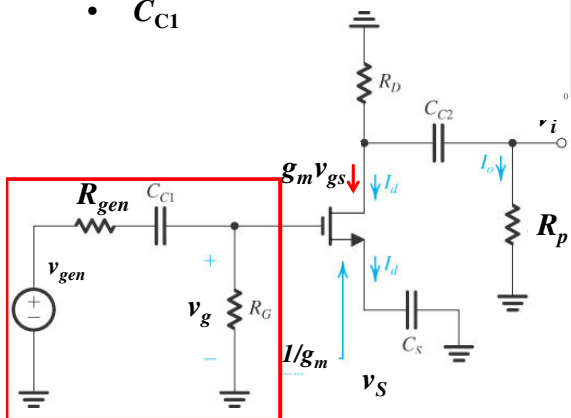
NF: Utiču  $C_{C1}$ ,  $C_S$  i  $C_{C2}$ ; posmatramo uticaj svakog posebno

- $C_{C1}$



$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C1} [R_G + R_{gen}]}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{C_{C1} [R_G + R_{gen}]}$$



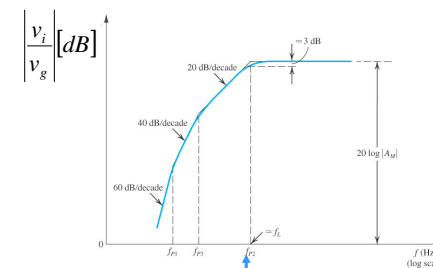
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

Dodatak

f) Analiza u frekvencijskom domenu

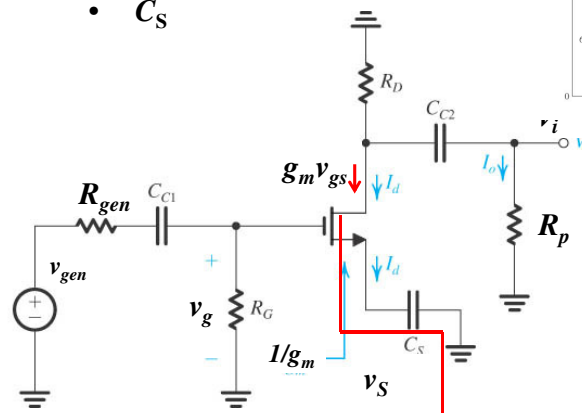
NF Utiču  $C_{C1}$ ,  $C_S$  i  $C_{C2}$ ; posmatramo uticaj svakog posebno

- $C_S$



$$f_{p2} = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_S}$$

$$\omega_{p2} = \frac{g_m}{C_S}$$



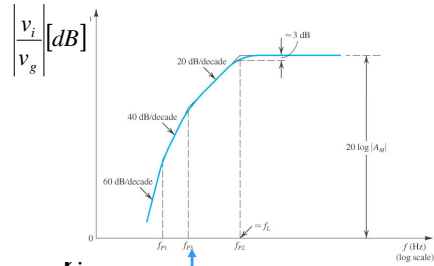
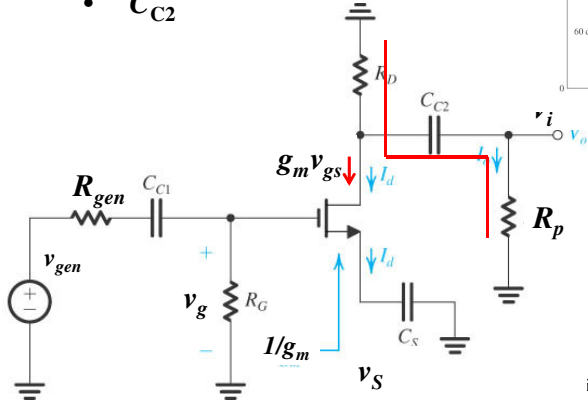
**Dodatak**

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

NF Utiču  $C_{C1}$ ,  $C_S$  i  $C_{C2}$ ; posmatramo uticaj svakog posebno

- $C_{C2}$



$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C2} (R_D + R_p)}$$

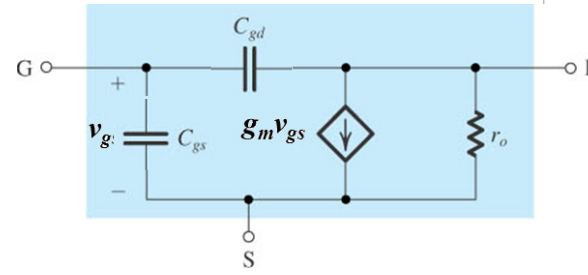
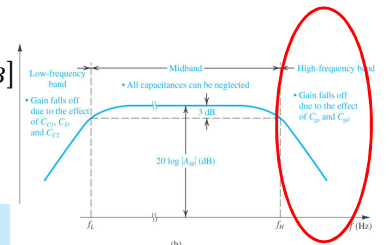
$$\omega_{p3} = \frac{1}{C_{C2} (R_D + R_p)}$$

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

Na VF:  $C_{gd}$  i  $C_{gs}$  dolaze do izražaja

- $C_{gd}$  kratkospaja G i D
- $C_{gs}$  kratkospaja G za S (masu)

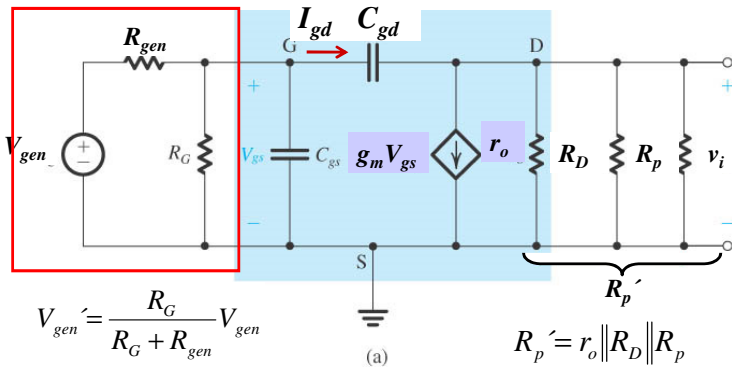


**Dodatak**

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF –  $C_{C1}$ ,  $C_{C2}$  i  $C_S$  predstavljaju kratak spoj  
Tranzistor se zamenjuje hibridnim  $\pi$  modelom



$$V_{gen}' = \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} V_{gen}$$

$$R_{gen}' = R_{gen} \parallel R_G$$

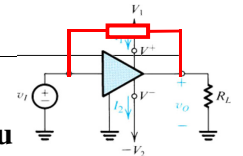
$$R_p' = r_o \parallel R_D \parallel R_p$$

**Dodatak**

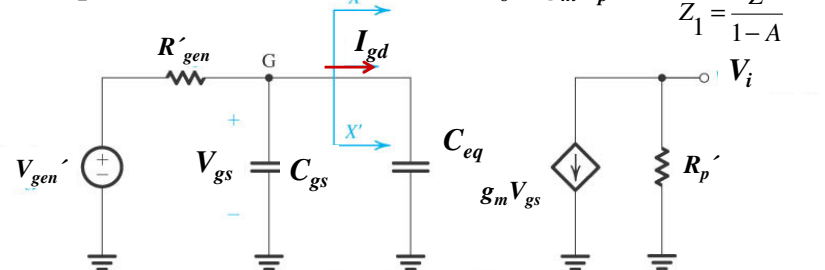
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Zamena Tevenenovim generatorom na ulazu i primena Milerove teoreme, za  $A_o = -g_m R_p'$



$$Z_1 = \frac{Z}{1 - A}$$



$$C_{eq} = C_{gd} (1 + g_m R_p')$$

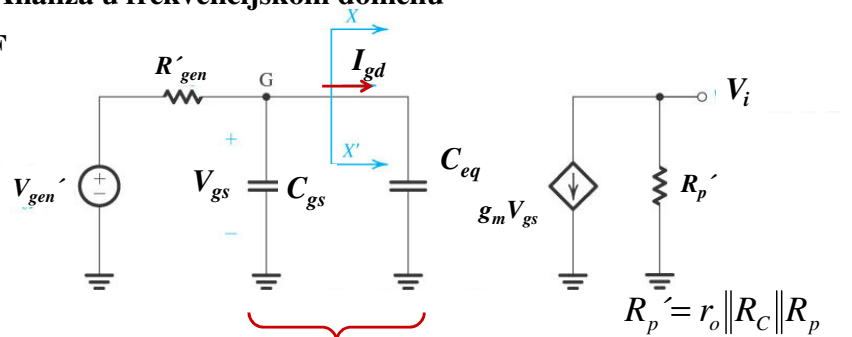
$$R_p' = r_o \parallel R_C \parallel R_p$$

$$I_{gd} = s C_{eq} V_{gs}$$



f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF



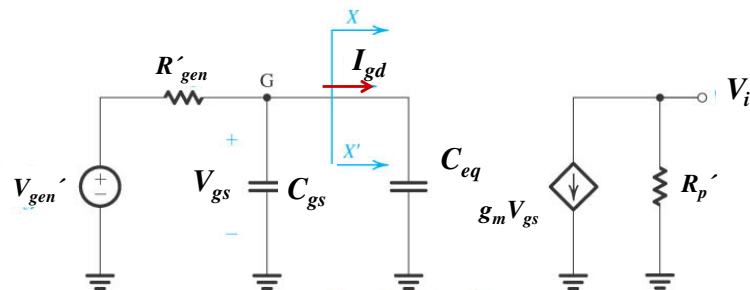
$$C_u = C_{gs} + C_{eq} = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R_p')$$

$$V_{gs} = \frac{1/sC_u}{R'_{gen} + 1/sC_u} V'_{gen} = \frac{1}{1 + sC_u R'_{gen}} V'_{gen} = \frac{1}{1 + sC_u R'_{gen}} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} V_{gen}$$

1

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Ukupno pojačanje na VF



$$V_i = -g_m V_{gs} R_p' = -g_m \frac{1}{1 + sC_u (R_{gen} \parallel R_G)} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} (r_o \parallel R_D \parallel R_p) V_{gen}$$

$$A_u = \frac{V_i}{V_{gen}} = -g_m \frac{1}{1 + sC_u (R_{gen} \parallel R_G)} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} (r_o \parallel R_D \parallel R_p) = \frac{A}{1 + s/\omega_o}$$

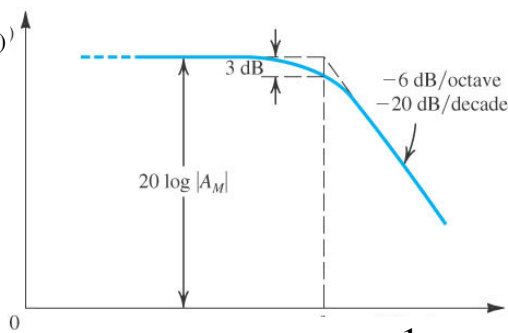
2

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Gornja granična frekvencija

$$\frac{V_i}{V_g} = \frac{A}{1 + s/\omega_o}$$

$$\left| \frac{V_i}{V_g} \right| \text{ (dB)}$$



$$\omega_o = \omega_v = \frac{1}{C_u R'_{gen}}$$

$$(d) f_v = \frac{1}{2\pi \cdot C_u R'_{gen}}$$

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Rezime

Gornja granična frekvencija određena je vremenskom konstantom  $R_{gen} \parallel R_G$  i  $C_u$ .

$R_{gen}$  utiče na  $f_v$ .

U  $C_u$  dominira  $C_{eq}$ , zapravo deo  $C_{gd}$  koji se preslikava na ulaz.

Iako je  $C_{gd}$  malo, preslikava se kao  $(1 + g_m R_p')$  puta veća kapacitivnost i snižava  $f_v$ .

Postoji način da se smanji uticaj Milerovog efekta; o tome kasnije (kaskodni pojačavači)

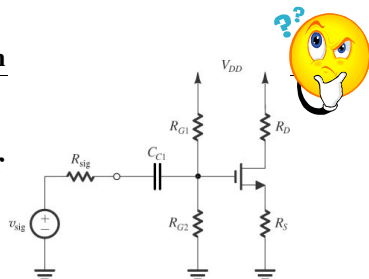


Pojačavač sa zajedničkim sorsom

**Domaći 6.1:**

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $V_t=1V$ ,  $\mu_n C_{ox} \cdot W/L=1mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $V_{DD}=15V$ .



- Odrediti vrednosti ostalih elemenata kola pod uslovom da je  $I_D=0.5mA$  i da su padovi napona na  $R_D$  i  $R_S$  isti i iznose  $V_{DD}/3$ . ( $R_D=R_S=10k$ ,  $R_{G1}=8M$ ,  $R_{G2}=7M$ )
- Izračunati za koliko će se promeniti  $I_D$  ukoliko se tranzistor zameni drugim kod koga je  $V_t=1.5V$ . ( $I_D=0.45mA$ ,  $\Delta I_D=-0.05mA$ ,  $\Delta I_D/I_D=-10\%$ )
- Ponoviti postupak pod a i b) u slučaju da se zadrži ista vrednost za  $I_D$  i  $R_D$  a da je  $R_S=0$ . ( $R_{G1}=13M$ ,  $R_{G2}=2M$ ,  $\Delta I_D=-0.375mA$ ,  $\Delta I_D/I_D=-75\%$ )
- Izračunati naponsko pojačanje ulaznu i izlaznu otpornost u slučaju a) i c). ( $A_v=-10/11$ ,  $R_{uu}=3.73M$ ,  $R_{ic}=10k$ ,  $A_c=10$ ,  $R_{uc}=1.73M$ ,  $R_{ic}=10k$ )

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

**2. Pojačavač sa zajedničkim gejtom**

- Princip rada
- DC polarizacija (kao za ZS)  
Odnosi snaga  
Stabilnost
- Analiza za male signale
  - Ulazna otpornost
  - Pojačanje
  - Izlazna otpornost
- Analiza u frekvencijskom domenu (info)

29. novbar 2016.

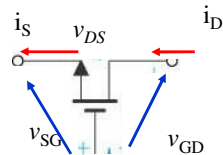
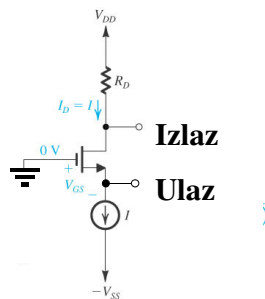
Jednostepeni MOSFET pojačavači

66

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

**a) Princip rada:**

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZG
  - Ulaz  $-v_S$  pobuda u kolu sorsa
  - Izlaz  $-i_D$ ,  $v_D$  potrošač u kolu drejna
- Tranzistor radi u oblasti zasićenja
- Pojačava male signale (u okolini radne tačke)
- Ne obrće fazu
- Pojačavač napona

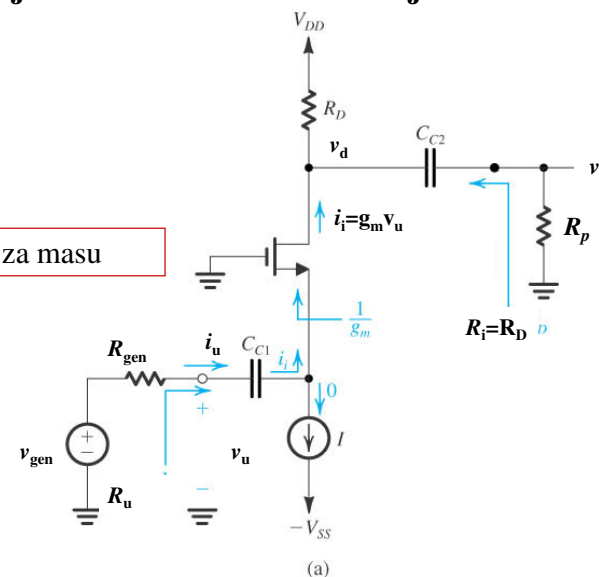


67

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

**b) DC polarizacija - izvor konstantne struje**

Gejt direktno vezan za masu

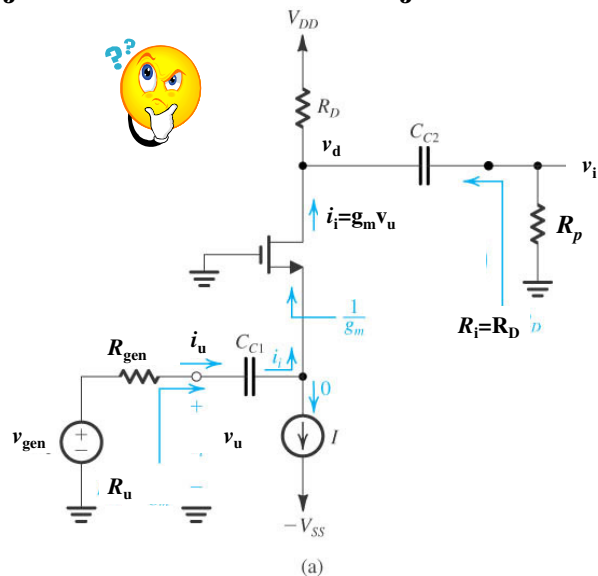


b) DC polarizacija - izvor konstantne struje

Da li obrće fazu?



$v_{gen}$   
 $v_S$   
 $v_{GS} = v_G - v_S$   
 $i_D$   
 $v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$   
**NE obrće fazu**



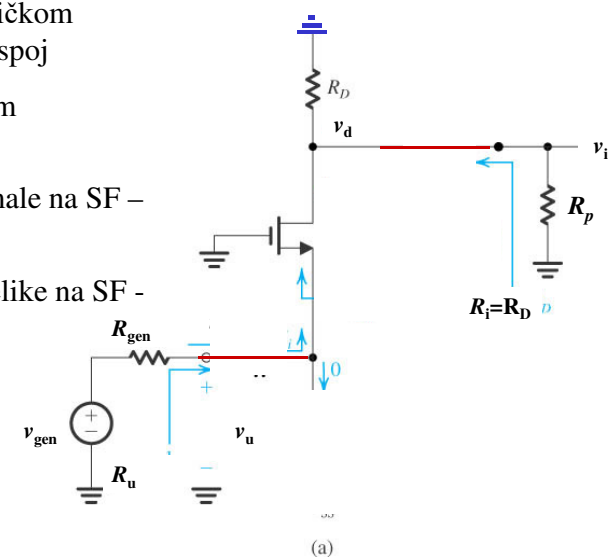
c) Analiza za male signale

VDD zamenjen dinamičkom otpornošću =0; kratak spoj

I zamenjen dinamičkom otpornošću prekid

Reaktanse  $C_{C1}$  i  $C_{C2}$  male na SF – kratak spoj

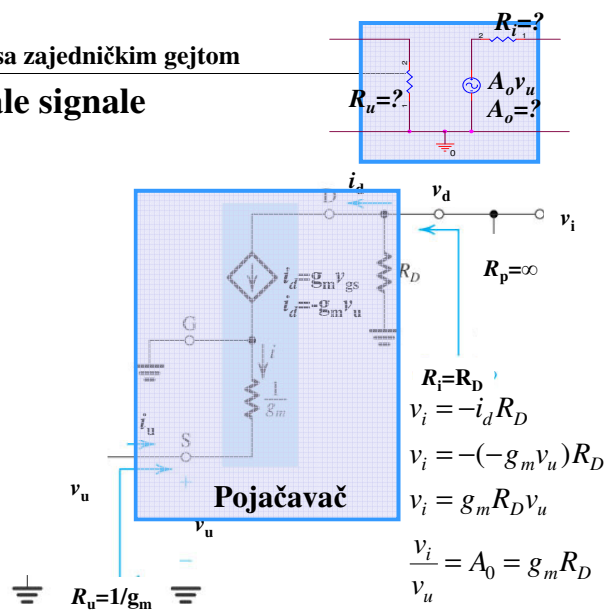
Reaktanse  $C_{gs}$  i  $C_{gd}$  velike na SF - prekid



c) Analiza za male signale

$v_{gs} = v_g - v_s$   
 $v_{gs} = 0 - v_u = -v_u$   
 $i_d = g_m v_{gs} = -g_m v_u$

$$\frac{v_i}{v_u} = A_0 = g_m R_D$$



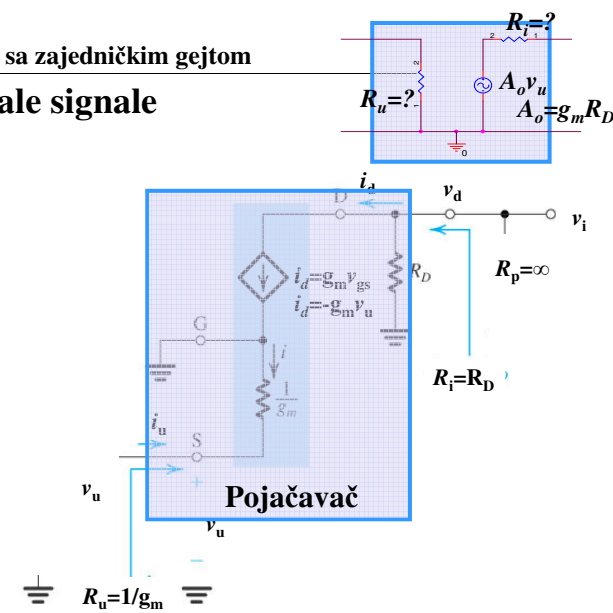
c) Analiza za male signale

$$R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{v_u}{-i_d}$$

$$R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{v_u}{-(-g_m v_u)}$$

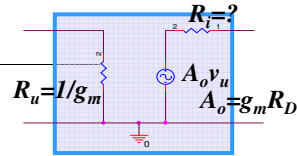
$$R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{1}{g_m}$$

$$R_u = \frac{1}{g_m}$$



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

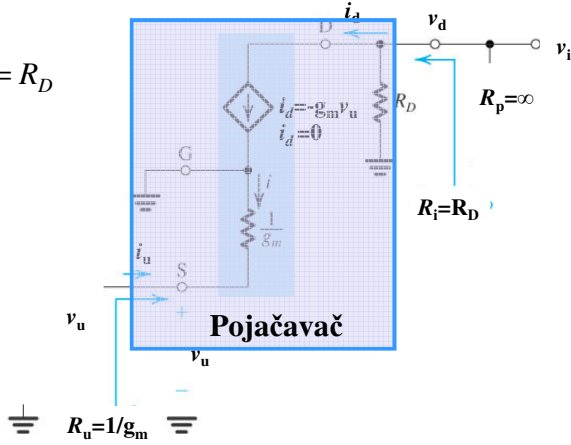
c) Analiza za male signale



$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0} = \frac{-i_d R_D}{-i_d} = R_D$$

$$R_i = R_D$$

$$R_i = R_D$$



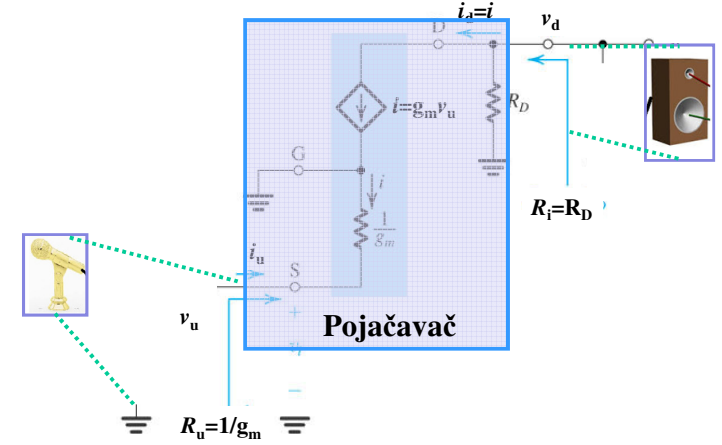
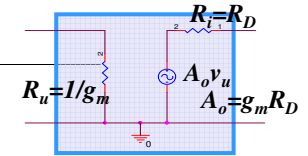
29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

73

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c) Analiza za male signale



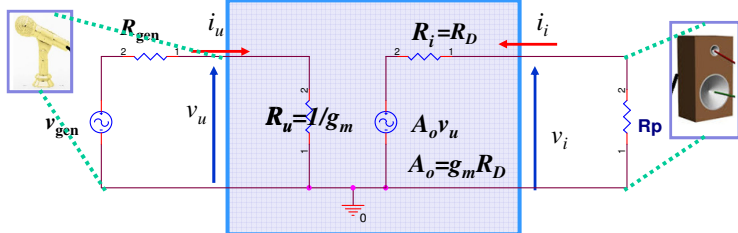
29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

74

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

e) Analiza za male signale



Za slučaj da je  $R_D=2\text{k}\Omega$ ,  $g_m=10\text{mS}$  ( $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$ )

$$R_u = 1/g_m = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100\Omega$$

$$A_u = \frac{R_p A_o}{R_p + R_i} \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} = \frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m \frac{1/g_m}{1/g_m + R_{gen}}$$

$$A_u = \frac{8 \cdot 2000}{2008} 10 \cdot 10^{-3} \frac{100}{700} \approx 0.01$$

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

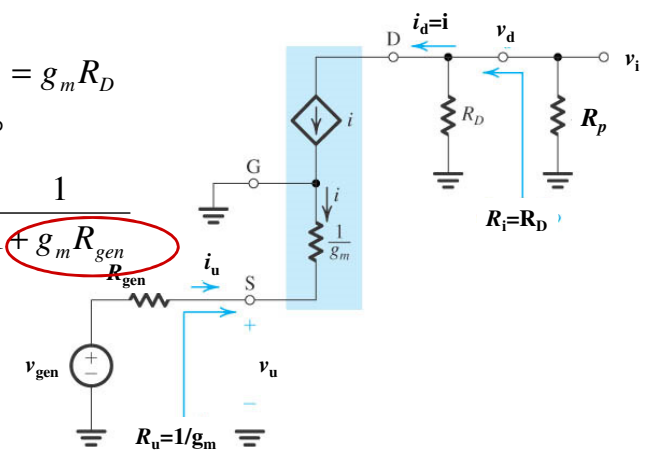
75

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c) Analiza za male signale

$$A_o = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = g_m R_D$$

$$A_u = g_m (R_D \parallel R_p) \frac{1}{1 + g_m R_{gen}}$$



Veoma mala ulazna otpornost degradira ukupno naponsko pojačanje kod ZG

76

c) Analiza za male signale

Poređenje	ZS	ZG
$R_u$	$R_G \gg$	$1/g_m$
$A_o$	$  -g_m R_D  $	$  g_m R_D  $
$R_i$	$R_D$	$R_D$
$A_u$	$-g_m (R_D    R_p) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}$	$g_m (R_D    R_p) \frac{1}{1 + g_m R_{gen}}$

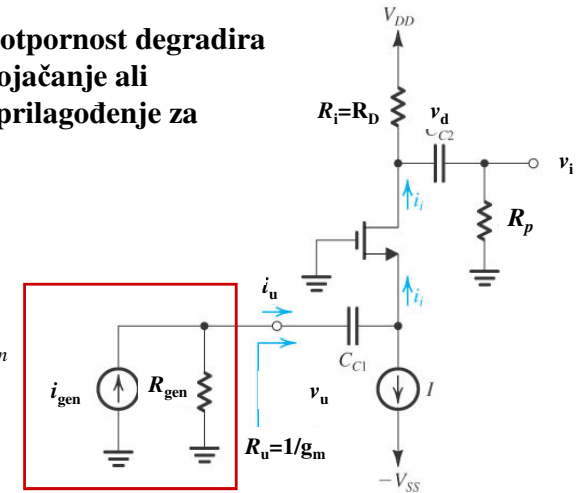
c) Analiza za male signale

Veoma mala ulazna otpornost degradira ukupno naponsko pojačanje ali predstavlja odlično prilagođenje za pojačavač struje

$$i_u = \frac{R_{gen}}{R_{gen} + R_u} i_{gen}$$

$$i_u = \frac{R_{gen}}{R_{gen} + 1/g_m} i_{gen}$$

$$i_u \cong i_{gen}$$



c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje (IC)

Balk i gejt su uzemljeni  $v_G=v_B=0$

Sors i balk nisu na istom potencijalu

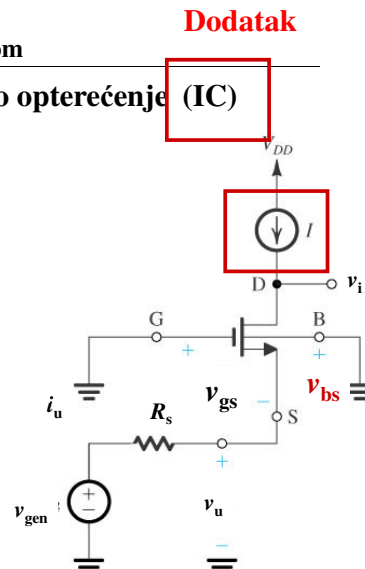
$$v_{BS} \neq 0; v_{GS} = v_{BS}$$

$$i_d = g_m v_{gs} + g_{mb} v_{bs}$$

$$i_d = (g_m + g_{mb}) v_{gs}$$

U prethodnim izrazima treba zameniti:

- i.  $g_m$  sa  $g_m + g_{mb}$
- ii.  $R_D$  sa  $r_o$  tranzistora koji predstavlja aktivno opterećenje



c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje (IC)

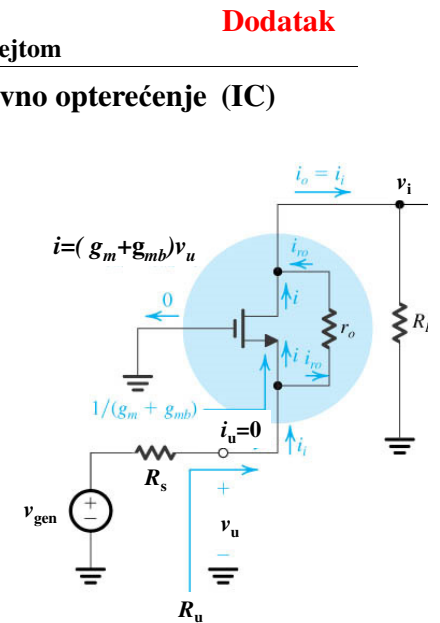
$$R_u = \frac{r_o + R_p}{1 + (g_m + g_{mb})r_o} \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

$$A_o = 1 + (g_m + g_{mb})r_o$$

$$R_{it} = r_o$$

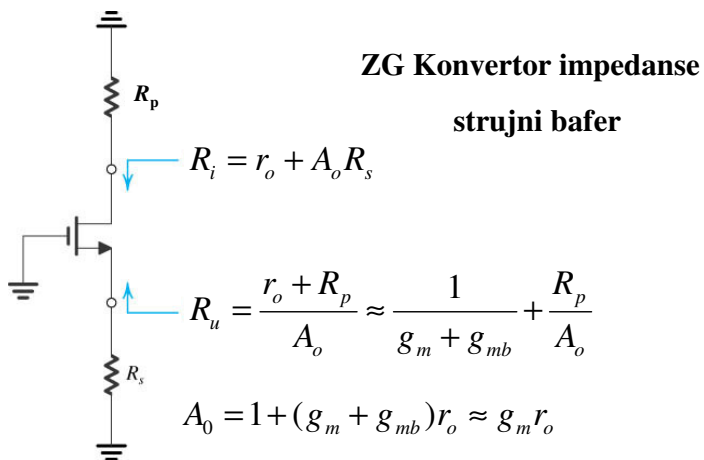
$$R_u = \frac{r_o + R_p}{A_o} \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}} + \frac{R_p}{A_o}$$

$$R_i = r_o + A_o R_s$$



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje (IC)



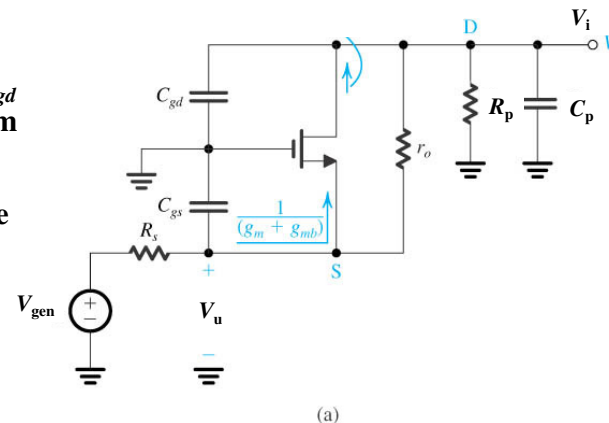
Pojačavač sa zajedničkim gejtom

d) Frekvencijska analiza – aktivno opterećenje (IC)

VF

Mileroov efekat nije dominantan jer su  $C_{gd}$  i  $C_{gs}$  uzemljeni jednim krajem.

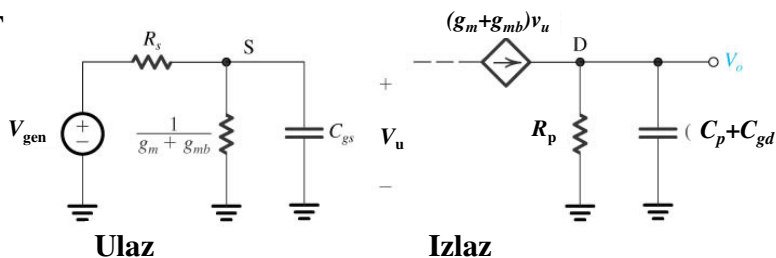
$C_{ds}$  ne dominira jer je malo



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

d) Frekvencijska analiza – aktivno opterećenje (IC)

VF



$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{gs} \left( R_s \parallel \frac{1}{g_m + g_{mb}} \right)} > f_{P2} = \frac{1}{2\pi \cdot (C_{gd} + C_p) R_p}$$

$f_v = f_{P2}$  mnogo veća nego kod ZS

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

**Domaći 6.2:**

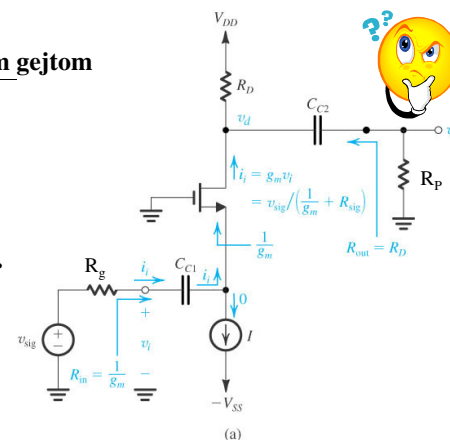
U kolu sa slike upotrebljen je

tranzistor sa  $V_t=1.5V$ ,

$\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=1mA/V^2$ ,  $V_A=75V$ .

Poznato je  $V_{DD}=V_{SS}=10V$ ,

$I_D=0.5mA$ ,  $R_D=15k$ .



a) Odrediti vrednosti jednosmernih napona  $V_D$  i  $V_S$ . ( $V_D=2.5V$ ,  $V_S=-2.5V$ )

b) Odrediti  $A_0$ ,  $R_u$ ,  $R_i$  i  $A_v$  ukoliko je  $R_p=15k$ ,  $R_g=50\Omega$ . ( $A_0=15V/V$ ,  $R_u=1k$ ,  $R_i=15k$ ,  $A_v=7.5V/V$ )

c) Odrediti ukupno naponsko pojačanje ukoliko je  $R_g=1k$ , **10k, 100k**. ( $3.75V/V$ ,  $0.68V/V$ ,  $0.07V/V$ )

### 3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (source follower)

- a. Princip rada
- b. DC polarizacija
- c. Stabilnost
- d. Analiza za male signale
- e. Ulazna otpornost
- f. Pojačanje
- g. Izlazna otpornost
- d. Analiza u frekvencijskom domenu

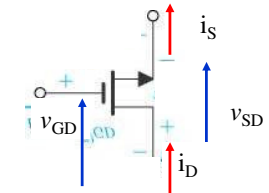
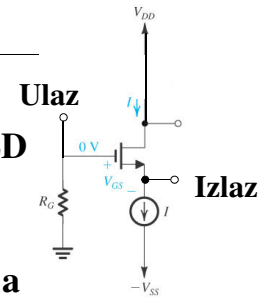
### a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZD

Ulaz –  $v_G$  pobuda u kolu gejta

Izlaz –  $v_S$  potrošač u kolu sorsa

- Tranzistor radi u oblasti zasićenja
- Pojačava male signale (u okolini radne tačke)
- Ne obrće fazu
- Pojačavač napona



### b) DC polarizacija - izvor konstantne struje

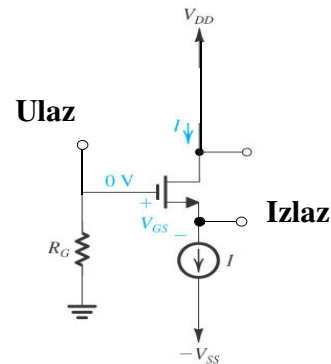
Da li obrće fazu?

$$I = I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = Const.$$

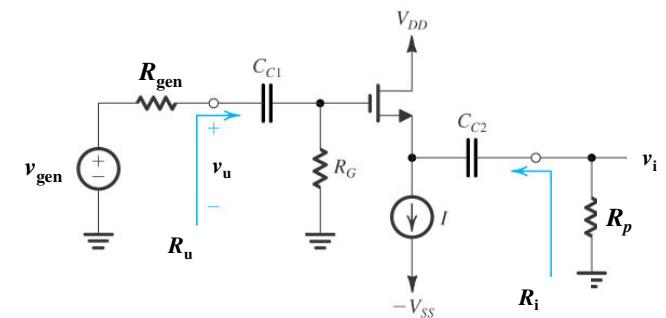
Zato je  $i_{V_{GS}} = Const.$

Odnosno  $V_S$  mora da prati promene  $V_G$

**NE obrće fazu**



### b) DC polarizacija - izvor konstantne struje



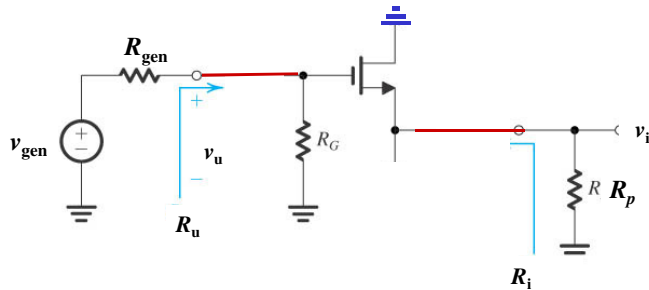
Pojačavač sa zajedničkim drenom

c) Analiza za male signale

SF

I i VDD zamenjeni dinamičkim otpornostima;

D kratkospojen za masu.



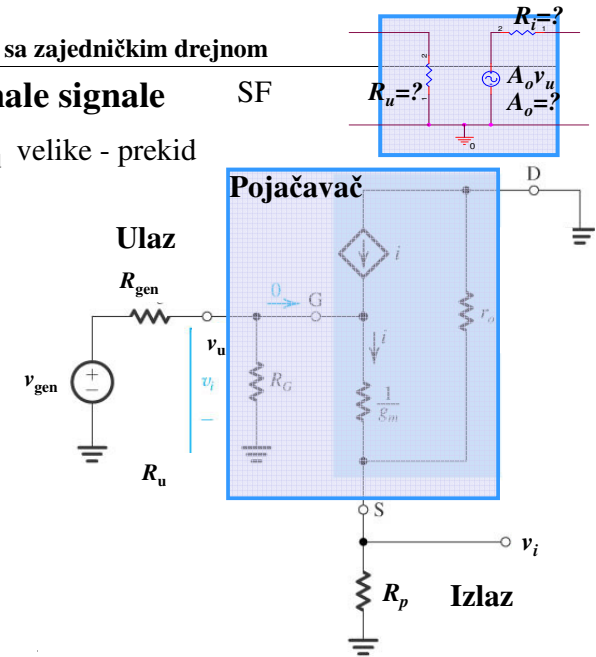
Reaktanse  $C_{C1}$  i  $C_{C2}$  male na SF

Pojačavač sa zajedničkim drenom

c) Analiza za male signale

SF

Reaktanse  $C_{gs}$  i  $C_{gd}$  velike - prekid



Pojačavač sa zajedničkim drenom

c) Analiza za male signale

$$v_g = v_u$$

$$v_i = v_s$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = v_u - v_i$$

$$i_d = g_m v_{gs} = g_m (v_u - v_i)$$

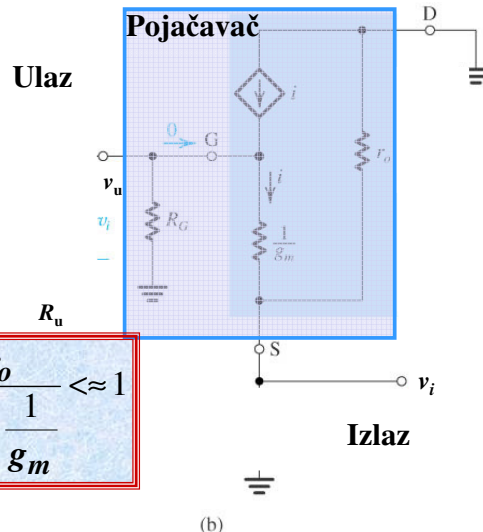
$$v_i = i_d r_o$$

$$v_i = g_m (v_u - v_i) r_o$$

$$v_i (1 + g_m r_o) = g_m r_o v_u$$

$$\frac{v_i}{v_u} = A_o = \frac{g_m r_o}{1 + g_m r_o}$$

$$A_o = \frac{r_o}{r_o + \frac{1}{g_m}} \ll 1$$

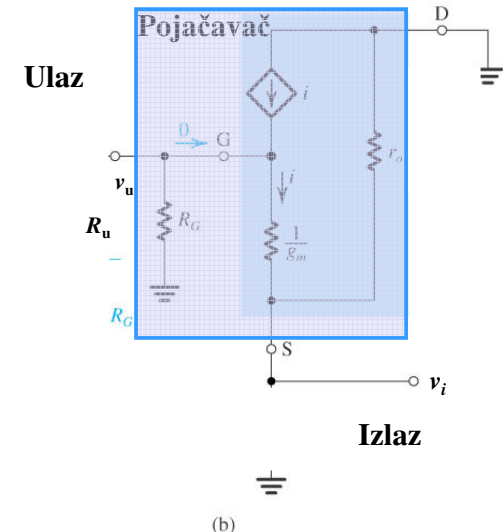


Pojačavač sa zajedničkim drenom

c) Analiza za male signale

$$R_u = \frac{v_u}{i_u} = R_G$$

$$R_u = R_G$$



Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0}$$

$$i_i = \frac{v_i}{r_o} - i_d$$

$$i_d = g_m v_{gs} = g_m (v_g - v_s)$$

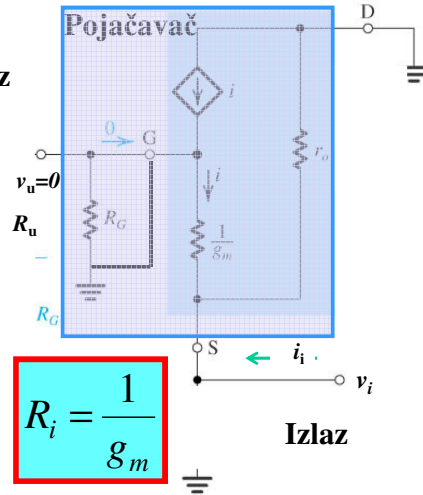
$$i_d = g_m (0 - v_i) = -g_m v_i$$

$$i_i = \frac{v_i}{r_o} - (-g_m v_i) = v_i \left( \frac{1}{r_o} + g_m \right)$$

$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0} = \frac{r_o}{1 + g_m r_o} \approx \frac{r_o}{g_m r_o} = \frac{1}{g_m}$$

29. novbar 2016.

Ulaz

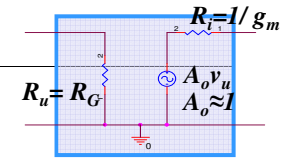


(b)

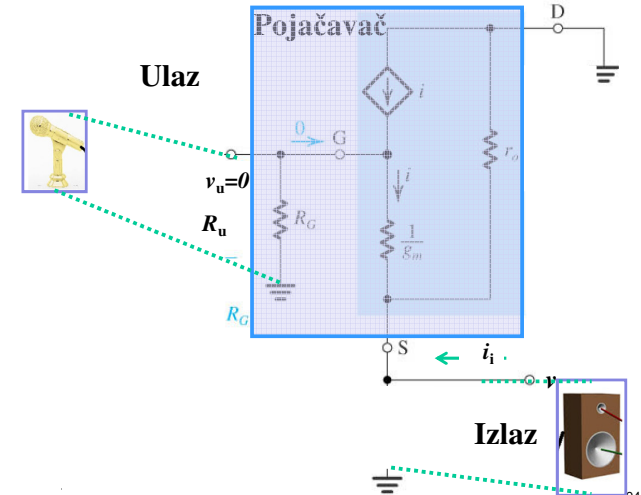
93

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale



Ulaz



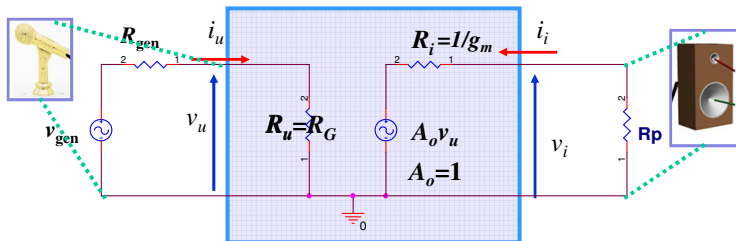
(b)

29. novbar 2016.

94

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



Za slučaj da je  $R_G=10\text{M}\Omega$ ,  $g_m=10\text{mS}$  ( $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$ )

$$R_u = R_G = 10 \cdot 10^6 \Omega; \quad R_i = 1/g_m = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega; \quad A_o = 1$$

$$A_u = \frac{R_p A_o}{R_p + R_i} \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} = \frac{R_p A_o}{R_p + 1/g_m} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}$$

$$A_u \approx \frac{8 \cdot 1}{108} \approx 0.07$$

29. novbar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

95

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

Poređenje	ZS	ZD
$R_u$	$R_G$ (veliko $[\text{M}\Omega]$ )	$R_G$ (veliko $[\text{M}\Omega]$ )
$A_o$	$  -g_m R_D   \gg 1$	$\frac{r_o}{r_o + 1/g_m} \ll 1$
$R_i$	$R_D \gg 1/g_m$	$1/g_m$ (malo $\times 10\Omega - 100\Omega$ )
$A_u$	$  -g_m (R_D \parallel R_p) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}   \gg 1$	$\frac{R_p}{R_p + 1/g_m} \cdot \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} < 1$

96



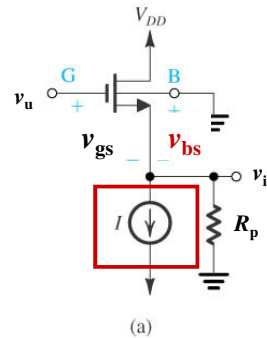
c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje u IC

Drejn i balk su uzemljeni  $v_d=v_b=0$

Sors i balk nisu na istom potencijalu

$v_{ds}=v_{bs} \neq 0$ ;

$$i_d = g_m v_{gs} + g_{mb} v_{bs}$$

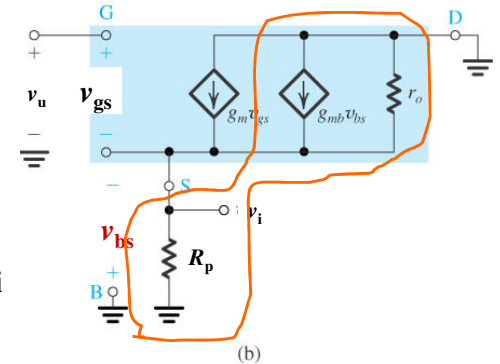


c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje u IC

Struja koja utiče u S

$g_{mb}(v_{bs}=v_{ds})$  predstavlja struju kroz otpornost  $1/g_{mb}$  kada je na njenim krajevima napon  $v_{ds}=v_{bs}$ .

To je ekvivalentno paralelnoj vezi  $1/g_{mb}$  sa  $R_p$  i  $r_o$

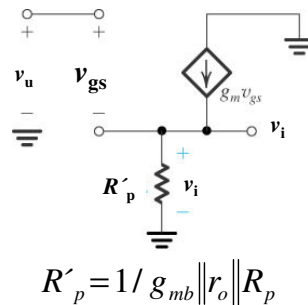


c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje u IC

Struja koja utiče u S

$g_{mb}(v_{bs}=v_{ds})$  predstavlja struju kroz otpornost  $1/g_{mb}$  kada je na njenim krajevima napon  $v_{ds}=v_{bs}$ .

To je ekvivalentno paralelnoj vezi  $1/g_{mb}$  sa  $R_p$  i  $r_o$



$$R'_p = 1/g_{mb} \parallel r_o \parallel R_p$$

$$\left. \begin{aligned} v_i &= g_m v_{gs} R'_p \\ v_{gs} &= v_u - v_i \end{aligned} \right\} A = \frac{v_i}{v_u} = \frac{g_m R'_p}{1 + g_m R'_p} < 1$$

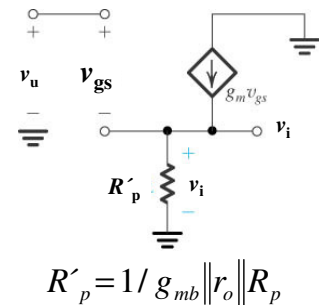
c) Analiza za male signale – aktivno opterećenje u IC

$$A_o = \frac{v_i}{v_u} \Big|_{R_p \rightarrow \infty}$$

$$A_o = \frac{g_m r_o}{1 + (g_m + g_{mb}) r_o} < 1$$

$$A_o \cong \frac{g_m}{(g_m + g_{mb})} < 1$$

$$R_i = \frac{1}{(g_m + g_{mb})} \parallel r_o$$

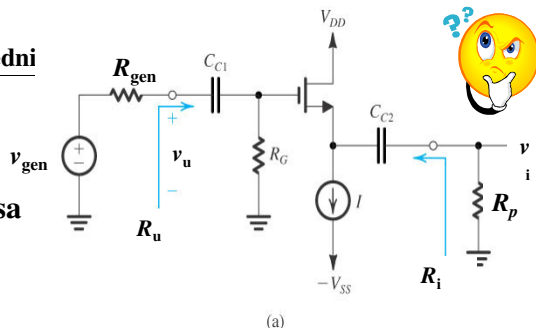


$$R'_p = 1/g_{mb} \parallel r_o \parallel R_p$$

### Pojačavač sa zajedni

#### Domaći 6.3:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $V_t=1.5V$ ,  $V_A=75V$ ,  $\mu_n C_{ox}' W/L=2A=1mA/V^2$ .  
Poznato je  $V_{DD}=V_{SS}=10V$ ,  $I_D=0.5mA$ ,  $R_G=4.7M$ ,  $R_P=15k$ .



a) Odrediti vrednosti jednosmernih napona  $V_G$  i  $V_S$ .

$$(V_G=0V, V_S=-2.5V)$$

b) Odrediti  $A_0$ ,  $R_u$ ,  $R_i$  i  $A_v$  ukoliko je  $R_G=1M\Omega$ .

$$(A_0=0.993V/V, R_u=4.7M, R_i=0.993k, A_v=0.768V/V)$$

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

101

### Kaskodni pojačavač

#### 4. Kaskodni pojačavač

- a. Princip rada
- b. DC polarizacija  
Odnosi snaga  
Stabilnost
- c. Analiza za male signale
  - i. Ulazna otpornost
  - ii. Pojaćanje
  - iii. Izlazna otpornost
- d. Analiza u frekvencijskom domenu

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

102

### Kaskodni pojačavač

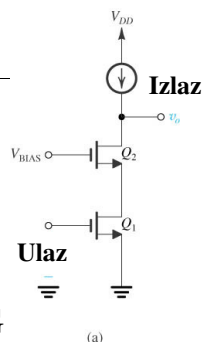
#### a) Princip rada:

Dva tranzistora:

- ZS, a kaskadno ZG kao opterećenje
- Ulaz –  $v_G$  pobuda u kolu gejtta ZS

Izlaz –  $v_D$  potrošač u kolu drejna ZG

- Tranzistori rade u oblasti zasićenja
- Pojaćava male signale (u okolini radne tačke)
- Obrće fazu
- Pojaćavač napona



(Naziv istorijski: KASKadno-katODA = kaskoda)

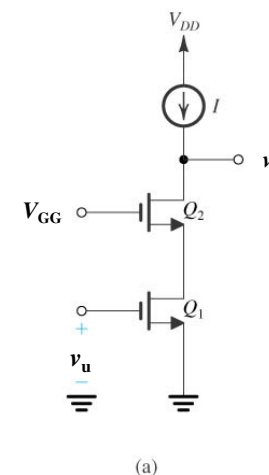
29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

103

### Kaskodni pojačavač

#### b) DC polarizacija



29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

104

### Kaskodni pojačavač

#### c) Analiza za male signale

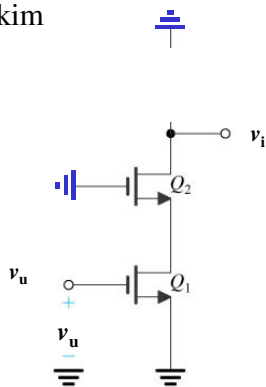
SF

$V_{DD}$ ,  $V_{GG}$  i I zamenjeni dinamičkim otpornostima:

$r_{DD}=0$ , D - vezan za masu

$r_{GG}=0$ , G - vezan za masu

$r_I \rightarrow \infty$  D - prekid



(a)

### Kaskodni pojačavač

#### c) Analiza za male signale

$R_i$

$$A_o = \frac{v_i}{v_u} \Big|_{R_p \rightarrow \infty}$$

$$A_o = \frac{v_{i1}}{v_u} \frac{v_i}{v_{i1}} \Big|_{R_p \rightarrow \infty}$$

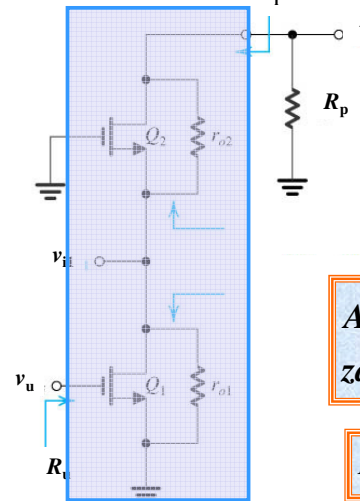
$$A_o = (-g_{m1}r_{o1})(g_{m2}r_{o2})$$

$$A_o = -(g_{m1}r_{o1})^2$$

za  $g_{m1} = g_{m2}$ ,  $r_{o1} = r_{o2}$

$$R_i \cong (g_{m2}r_{o2})r_{o1} = g_m r_o^2$$

$$R_u \rightarrow \infty$$



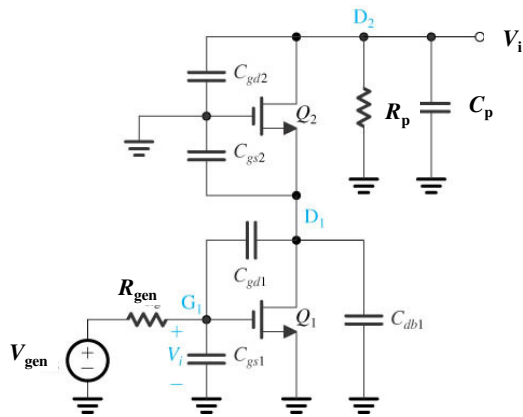
(b)

### Kaskodni pojačavač

#### d) Frekvencijska analiza

VF

Informativno

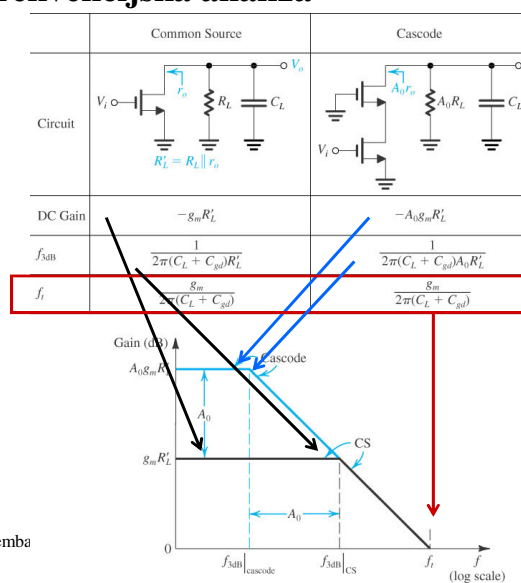


### Kaskodni pojačavač

#### d) Frekvencijska analiza

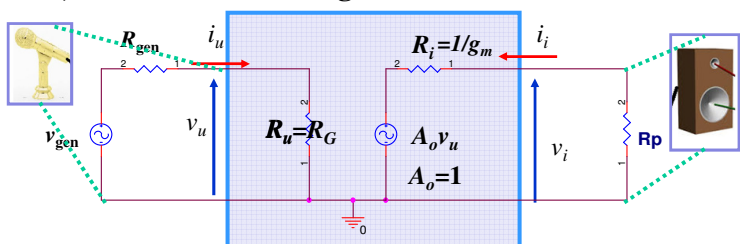
Informativno

VF



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



Za slučaj da je  $R_G=10\text{M}\Omega$ ,  $g_m=10\text{mS}$ ,  $r_o=100\text{k}\Omega$  ( $R_{gen}=600\Omega$ ,  $R_p=8\Omega$ )

$$R_u \rightarrow \infty; R_i = g_m r_o^2 = 10^8 \Omega; A_o = A_o = -(g_m r_o)^2 = -(10^{-2} \cdot 10^5)^2 = -10^6$$

$$A_u = \frac{R_p A_o}{R_p + R_i} = -\frac{(g_m r_o)^2 R_p}{R_p + R_i}$$

$$A_u \approx -10^6 \frac{8}{10^8 + 8} \approx -0.08$$

Pojačavač sa CMOS parom

4. Pojačavač sa CMOS parom

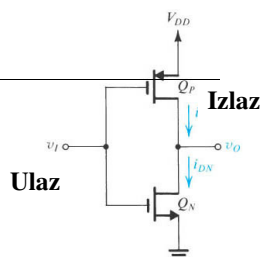
- a. Princip rada
- b. DC polarizacija
- c. Analiza za male signale
  - i. Ulazna otpornost
  - ii. Pojaćanje
  - iii. Izlazna otpornost
- d. Analiza u frekvencijskom domenu

Pojačavač sa CMOS parom

a) Princip rada:

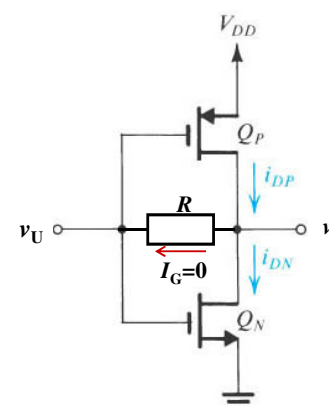
Dva komplementarna tranzistora (CMOS Invertor - digitalna NE funkcija)

- 2xZS vezana "paralelno"
- Ulaz –  $v_G$  pobuda u kolu gejta
- Izlaz –  $v_d$  potrošač u kolu drejna
- Tranzistori rade u oblasti zasićenja
- Pojaćava male signale (u okolini radne tačke)
- Obrće fazu
- Pojačavač napona

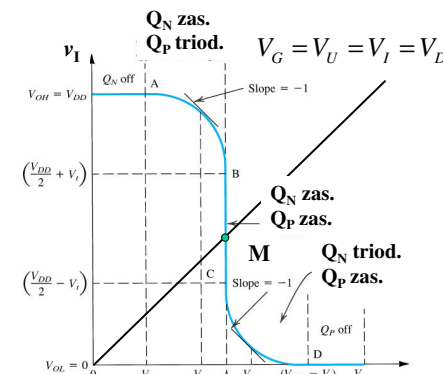


Pojačavač sa CMOS parom

b) DC polarizacija



$$V_G = V_U = V_I = V_D$$



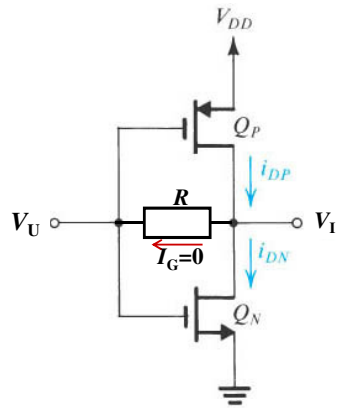
$$V_{GSN} = V_G = V_{DSN} = V_D; V_{GSN} + V_{GSP} = V_{DD}$$

$$I_{DN} = I_{DP}; \text{ za } A_N = A_P, V_{GSN} = V_{SGP};$$

$$V_{SGP} = V_{DD} - V_G = V_{SDP} = V_{DD} - V_D = V_{DD} / 2$$

Pojačavač sa CMOS parom

b) DC polarizacija



$$I_{DN} = I_{DP}$$

$$I_{DN} = \frac{\mu_N C_{ox} W_N}{2L_N} (V_{GSN} - V_{tN})^2$$

$$= A_N (V_G - V_{tN})^2$$

$$= I_{DP} = \frac{\mu_P C_{ox} W_P}{2L_P} (V_{SGP} - |V_{tP}|)^2$$

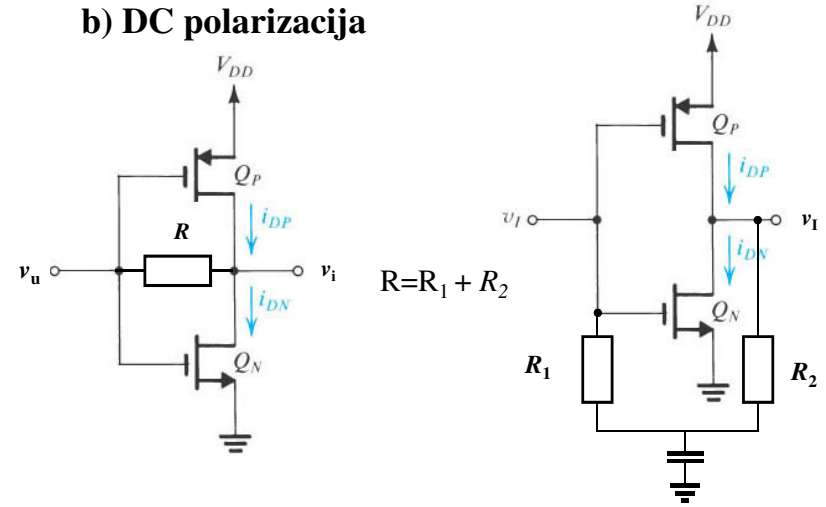
$$= A_P (V_{DD} - V_G - |V_{tP}|)^2$$

Za  $V_{tN} = -V_{tP}$ ;  $A_N = A_P$

$$V_G = V_{DD} / 2$$

Pojačavač sa CMOS parom

b) DC polarizacija



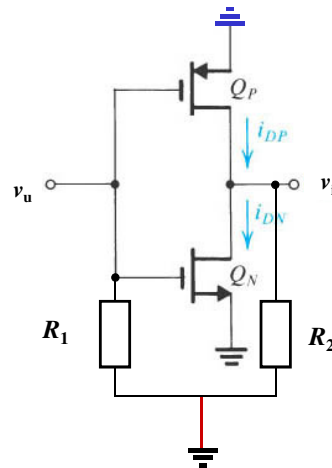
Pojačavač sa CMOS parom

c) Analiza za male signale

$V_{DD}$ , zamenjeni dinamičkim otpornostima:

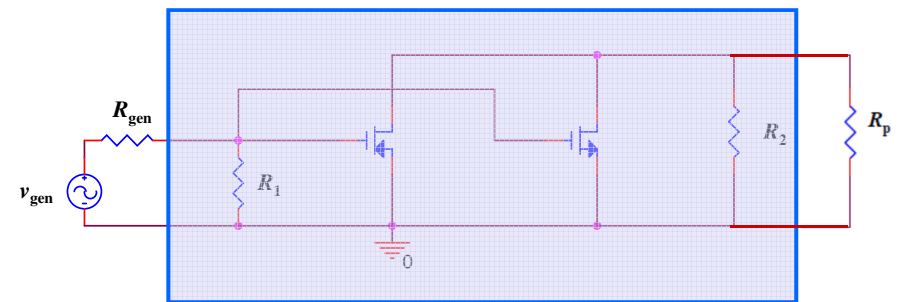
$r_{DD} = 0$ , vezan za masu

Reaktansa  $X_C = 0$

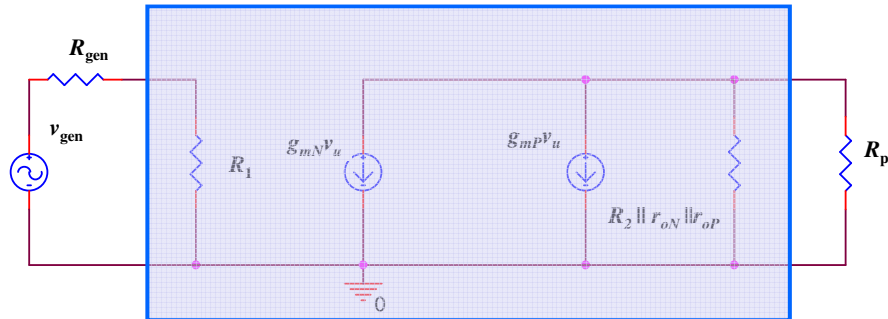


Pojačavač sa CMOS parom

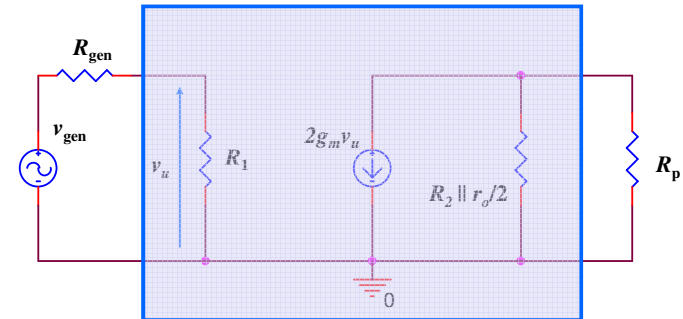
c) Analiza za male signale



c) Analiza za male signale



c) Analiza za male signale



c) Analiza za male signale

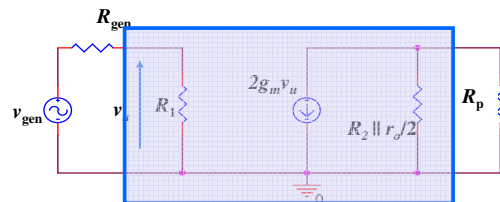
$$R_u = R_1$$

$$A_o = \frac{v_i}{v_u} \Big|_{R_p \rightarrow \infty}$$

$$A_o = -2g_m \left( \frac{r_o}{2} \parallel R_2 \right)$$

$$A_o \approx -2g_m \frac{r_o}{2} = -g_m r_o$$

$$R_i \cong \frac{r_o}{2} \parallel R_2 \approx \frac{r_o}{2}$$



$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}}$$

$$A_u = -2g_m \left( \frac{r_o}{2} \parallel R_2 \parallel R_p \right) \frac{R_1}{R_1 + R_{gen}}$$

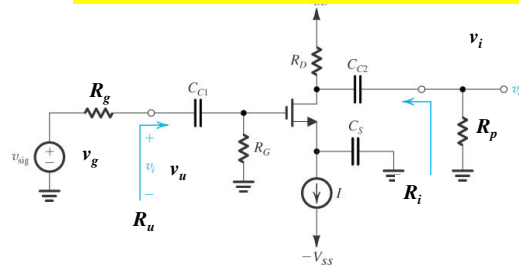
$$A_u \approx -2g_m \frac{r_o}{2} = -g_m r_o \text{ za } R_1 \gg R_{gen}$$

Rezime:

- Tranzistori rade u zasićenju:
 
$$V_{GS} > V_t; \quad V_{DS} > V_{GS} - V_t$$
- Za male signale tranzistor se ponaša kao linearni naponom kontrolisani strujni izvor  $i_d = g_m v_{gs}$ .

**Rezime:**

**1. Zajednički sors**



$R_u = R_G$  (reda MΩ) veliko

$A_0 = -g_m (r_o \parallel R_D)$

$A_0 \approx -g_m R_D$   
(reda x10 - x100V/V)

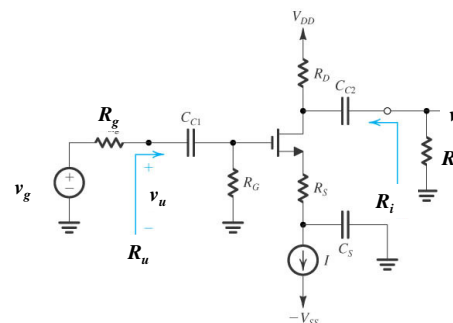
$A \approx -g_m (R_D \parallel R_p)$

$R_i = r_o \parallel R_D \approx R_D$  (reda x10kΩ)

$A_u \approx -\frac{R_G}{R_G + R_g} g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_p)$

**Rezime:**

**1.a Zajednički sors sa otpornikom u sorsu**



$R_u = R_G$

$A \approx -g_m \frac{(R_D \parallel R_p)}{1 + g_m R_S}$

$R_i \approx R_D$

$A_u \approx -\frac{R_G}{R_G + R_g} g_m \frac{(R_D \parallel R_p)}{1 + g_m R_S}$

Veća stabilnost

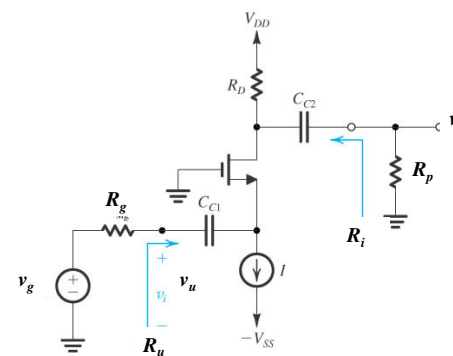
**Rezime:**

**• Konfiguracija sa zajedničkim sorsom:**

- S je na masi za naizmenični signal;
- Ulazni signal se dovodi na G;
- Izlazni signal uzima se sa D;
- Obrće fazu;
- Veliko pojačanje napona;
- Velika ulazna otpornost;
- Relativno velika izlazna otpornost;
- Otpornost  $R_S$  stabilizuje radnu tačku i popravljja amplitudsku karakteristiku ali smanjuje naponsko pojačanje

**Rezime:**

**2. Zajednički gejt**



$R_u = 1/g_m$  (reda x10 - 100Ω)  
malo!!!

$A_0 = g_m (r_o \parallel R_D)$

$A_0 \approx g_m R_D$   
reda x10 - 100V/V

$A = g_m (R_D \parallel R_p)$

$R_i \approx R_D$  (reda x10kΩ)

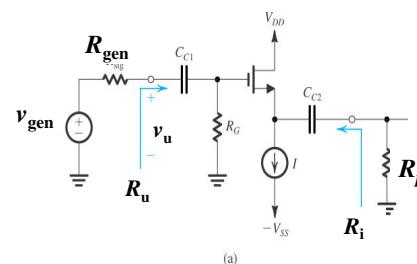
$A_u \approx g_m \frac{(R_D \parallel R_p)}{1 + g_m R_S}$

**Rezime:**

- **Konfiguracija sa zajedničkim gejtom:**  
**G je na masi za naizmenični signal;**  
**Ulazni signal se dovodi na S;**  
**Izlazni signal uzima se sa D;**  
**Ne obrće fazu;**  
**Veliko pojačanje napona;**  
**Veoma mala ulazna otpornost;**  
**Relativno velika izlazna otpornost**  
**(strujni bafer)**

**Rezime:**

**3. Zajednički drejn**



$$R_u = R_G \text{ (reda } M\Omega \text{) veliko}$$

$$A_o = \frac{r_o}{r_o + 1/g_m} \approx 1$$

$$A = \frac{r_o \parallel R_p}{r_o \parallel R_p + 1/g_m} < 1$$

$$R_i \approx \frac{1}{g_m} \text{ (reda } \times 10 - 100\Omega \text{) malo!!!}$$

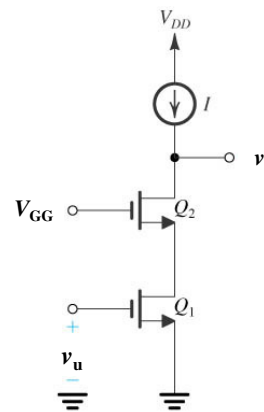
$$A_u \approx \frac{R_G}{R_G + R_g} \frac{r_o \parallel R_p}{r_o \parallel R_p + 1/g_m} < 1$$

**Rezime:**

- **Konfiguracija sa zajedničkim drejnom:**  
**D je na masi za naizmenični signal;**  
**Ulazni signal se dovodi na G;**  
**Izlazni signal uzima se sa S;**  
**Ne obrće fazu;**  
**Pojačanje napona  $\approx 1$**   
**Velika ulazna otpornost;**  
**Mala izlazna otpornost**  
**(naponski bafer)**

**Rezime:**

**4. Kaskodni pojačavač**



$$R_u \rightarrow \infty$$

$$A_o = -(g_{m1} r_{o1})^2 \text{ (reda } \times 1000 \text{)}$$

$$R_i \approx (g_{m2} r_{o2}) r_{o1} = g_m r_o^2 \text{ (reda } M\Omega \text{)}$$



### Jednostepeni pojačavači sa MOST

#### Rezime:

- **Kaskodna konfiguracija**  
**ZS sa ZG kao opterećenjem;**  
**Ulazni signal se dovodi na G ZS;**  
**Izlazni signal uzima se sa D ZG;**  
**Obrće fazu;**  
**Veoma veliko pojačanje napona**  
**Velika ulazna otpornost;**  
**Velika izlazna otpornost**

29. novembar 2016.

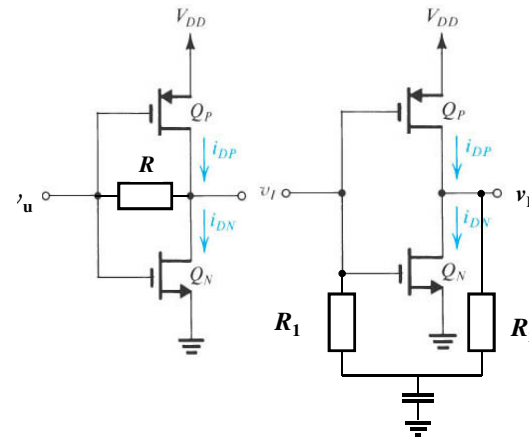
Jednostepeni MOSFET pojačavači

129

### Jednostepeni pojačavači sa MOST

#### Rezime:

#### 4. Pojačavač sa CMOS parom



$$R_u \approx R_1 \quad (\text{reda } M\Omega)$$

$$A_o \approx -2g_m \frac{r_o}{2} = -g_m r_o$$

$$R_i \approx \frac{r_o}{2} \parallel R_2 \approx \frac{r_o}{2}$$

(reda  $x10 - 100k\Omega$ )

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

130

### Jednostepeni pojačavači sa MOST

#### Rezime:

- **CMOS par**  
**2xZS u paraleli;**  
**Ulazni signal se dovodi na G;**  
**Izlazni signal uzima se sa D;**  
**Obrće fazu;**  
**Pojačanje napona kao ZS;**  
**Velika ulazna otpornost;**  
**Izlazna otpornost manja nego kod ZS;**  
**Ukupno naponsko pojačanje veće nego ZS**

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

131

### Jednostepeni pojačavači sa MOST



#### Šta smo naučili?

- **Uporediti pojačavače sa ZS, ZG i ZD sa stanovišta naponskog pojačanja, ulazne otpornosti i izlazne otpornosti.**
  - Električna šema, princip rada pojačavača sa ZS i ekvivalentno kolo za male signale na srednjim frekvencijama (SF).
  - Električna šema, princip rada pojačavača sa ZD i ekvivalentno kolo za male signale na SF.
  - Električna šema, princip rada kaskodnog pojačavača i ekvivalentno kolo za male signale na SF.

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

> EDUCATION > ELEKTRONIKA

29. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

slajdovi u pdf formatu

132



Ispitna pitanja?

1. U polju karakteristika ( $I_D$ - $V_{GS}$  i  $I_D$ - $V_{DS}$ ) nMOST-a u konfiguraciji pojačavača sa ZS označiti i napisati izraze koji određuju položaj karakterističnih tačaka. Objasniti fazni stav izlaznog napona.
2. U polju karakteristika ( $I_D$ - $V_{GS}$  i  $I_D$ - $V_{DS}$ ) nMOST-a u konfiguraciji pojačavača sa ZS objasniti uticaj promene  $R_D$  na naponsko pojačanje.
3. Odrediti izraze za naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača u konfiguraciji sa ZS.
4. Uticaj  $R_S$  i izvora konstantne struje u kolu sorsa na rad pojačavača sa ZS.
5. Frekvencijske karakteristike pojačavača sa ZS (objasniti zašto se smanjuje pojačanje na NF i VF).
6. Odrediti izraze za naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača u konfiguraciji sa ZG.
7. Objasniti odnos faza izlaznog i ulaznog napona kod pojačavača sa ZS, ZG i ZD.
8. Odrediti izraze za naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača u konfiguraciji sa ZD.
9. Električna šema i karakteristike pojačavača sa CMOS parom.

Sledećeg časa

Pojačavači sa bipolarnim tranzistorima

Rešenje: Domaći 5.1

Model MOS tranzistora



Za nMOS tranzistor kod koga je  $V_t=1V$ ,  $\mu_n C_{ox}=120\mu A/V^2$ ,  $W/L=10$  i  $\lambda=0.02V^{-1}$  odrediti:

a) opseg napona  $V_{GS}$  za koje tranzistor vodi;  
 $V_{GS} > V_T = 1V$ ;

b) napon  $V_{DS}$  u funkciji  $V_{GS}$  pri kome tranzistor ulazi u zasićenje;  
 $V_{DS} > V_{GS} + V_T = V_{GS} + 1V$ ;

c) dinamičke parametre tranzistora:  $g_m$  i  $r_o$  u radnoj tački definisanoj sa  $I_D=75\mu A$ , ako se zna da tranzistor radi u zasićenju;

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} - V_t = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{75 \cdot 10^{-6}}{\frac{1}{2} 120 \cdot 10^{-6} \cdot 10}} = 0,35V$$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \left( \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \right) \cdot 2 \cdot (V_{GS} - V_t) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{0,35} = 424 \mu A/V$$

Rešenje: Domaći 5.1

Model MOS tranzistora

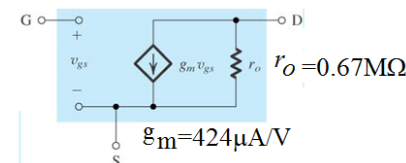


Za nMOS tranzistor kod koga je  $V_t=1V$ ,  $\mu_n C_{ox}=120\mu A/V^2$ ,  $W/L=10$  i  $\lambda=0.02V^{-1}$  odrediti:

c) dinamičke parametre tranzistora:  $g_m$  i  $r_o$  u radnoj tački definisanoj sa  $I_D=75\mu A$ , ako se zna da tranzistor radi u zasićenju;

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0,02 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 666,66k\Omega \approx 0.67M\Omega$$

d) nacrtati model i upisati vrednosti parametara;



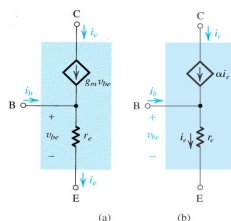
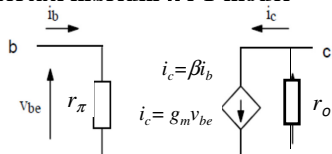
## Rešenje: Domaći 5.2

### Model bipolarnog tranzistora



BJT sa  $\beta=100$ , i  $V_A=100V$  polarisan je u radnoj tački sa  $I_C=1mA$  i  $V_{CE}=5V$ .

Nacrtati hibridni  $\pi$  i T model



i odrediti dinamičke parametre u radnoj tački:

a)  $g_m$ : 
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0.026V} = 38,4mA/V \approx 40mA/V$$

b)  $r_\pi$ : 
$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{100 \cdot 0.026V}{1mA} = 2,6k\Omega \approx 2,5k\Omega$$

c)  $r_o$ : 
$$r_o = \frac{V_A + |V_{CE}|}{I_C} = \frac{(100+5)V}{1mA} = 105k\Omega$$

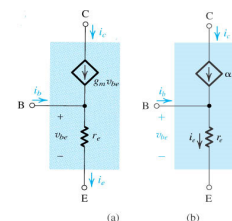
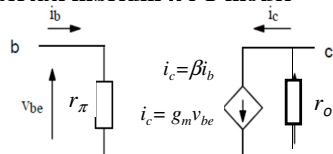
## Rešenje: Domaći 5.2

### Model bipolarnog tranzistora



BJT sa  $\beta=100$ , i  $V_A=100V$  polarisan je u radnoj tački sa  $I_C=1mA$  i  $V_{CE}=5V$ .

Nacrtati hibridni  $\pi$  i T model



i odrediti dinamičke parametre u radnoj tački:

d)  $\alpha$ : 
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = \frac{100}{101} = 0,99 \approx 1$$

e)  $r_e$ : 
$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{101}{100} \frac{1}{38,4mA/V} = 25,78k\Omega \approx 25k\Omega$$

f) Uporediti  $g_m$  sa odgovarajućim parametrom MOSFETa iz prethodnog zadatka

$$g_{mBJT} = 38,4mA/V > g_{mMOSFET} = 424\mu A/V = 0,424mA/V$$