

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: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

17. novembar 2016.

Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

1

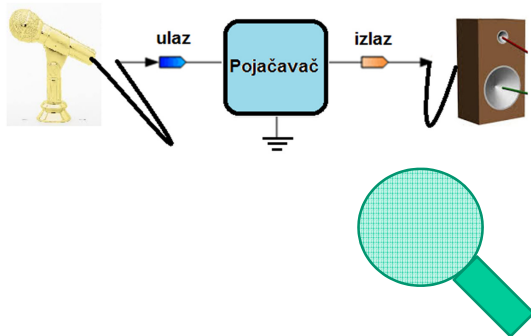
1

Jednostepeni MOSFET pojačavači

2

Osnovi elektronike

Najzad da vidimo od čega se sastoji, kako radi, kako se pravi pojačavač?



17. novembar 2016.

Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

3

3

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

17. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

4

MOSFET – transkonduktanski pojačavač:

• **Tranzistor radi u oblasti zasićenja:**

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

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

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

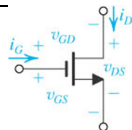
$$i_G = 0$$

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

• **Laka realizacija u IC**

17. 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 (ravna amplitudska, na SF)

Pojačanje?

Ulazna otpornost?

Izlazna otpornost?

Ponašanje na niskim frekvencijama, NF

Ponašanje na visokim frekvencijama, VF

17. novembar 2016.

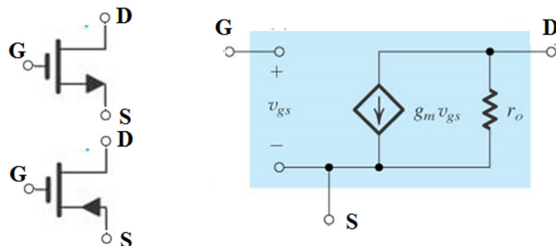
Jednostepeni pojačavači sa BJT

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



17. novembar 2016.

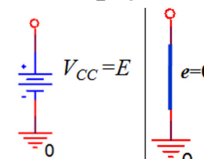
Jednostepeni pojačavači sa BJT

Važi za SVE konfiguracije:

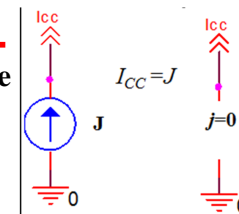
Postupak AC analize (za male signale):

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



17. 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) Svi elementi neophodni za DC polarizaciju tranzistora ulaze u kolo pojačavača

B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost

17. novembar 2015.

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)

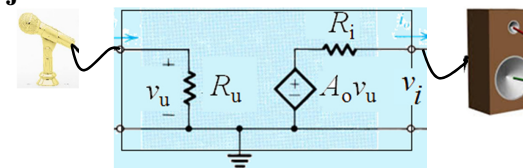
B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost?

C) Pojačavač u kolu zamenimo modelom



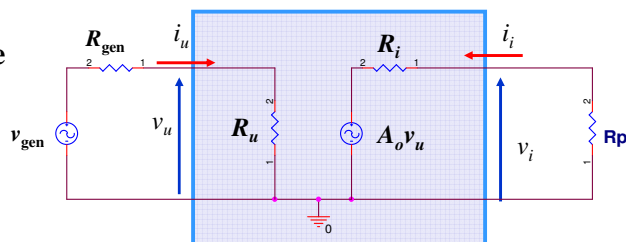
17. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

10

Analiza za male signale

Odredimo
ukupno pojačanje



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

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

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

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

17. 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

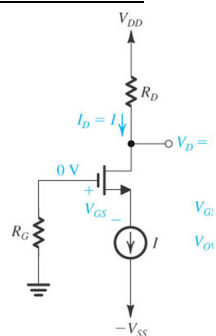
17. novembar 2016.

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. Pojačanje?
 - ii. Ulazna otpornost beskonačna
 - iii. Izlazna otpornost?
- f. Analiza u frekvencijskom domenu



a) Princip rada:

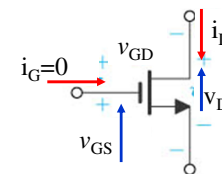
- **Tranzistor radi u konfiguraciji ZS**

Ulaz => v_{GS} pobuda u kolu gejta

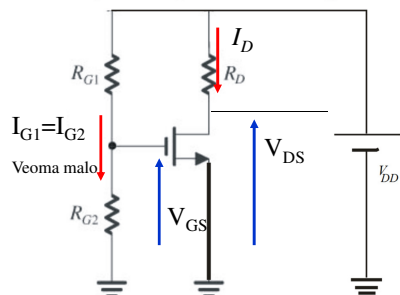
Izlaz => i_D, v_{DS} potrošač u kolu drejna

$$i_D = i_S$$

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



b) DC polarizacija



$$I_G = 0$$

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

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

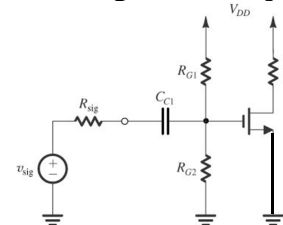
$$I_D = A \cdot (V_{GS} - V_t)^2 = A \cdot V_{OV}^2$$

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

Obezbediti rad u oblasti zasićenja:

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

b) DC polarizacija

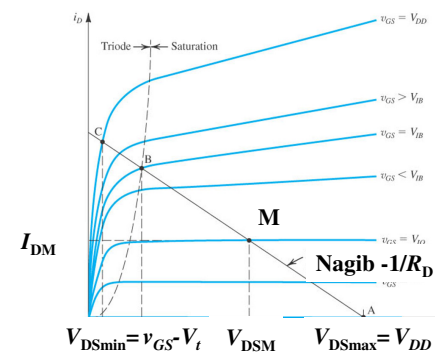


Obezbediti rad u oblasti zasićenja:

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

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

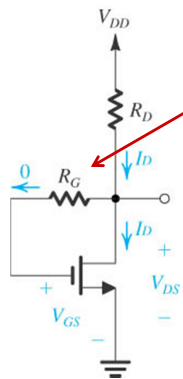
$$V_{DSM} = V_{DD}/2$$



Dinamički opseg izlaznog napona

$$v_{DS}$$

b) DC polarizacija - otpornik G-D



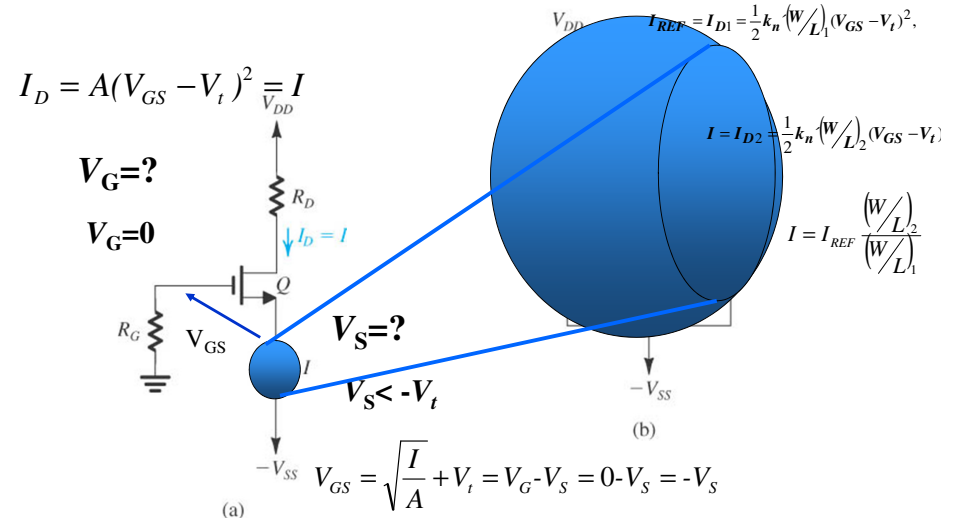
$V_{GS} = V_{DS}$, Zašto? 🤔

Šta to znači?

Tranzistor uvek u zasićenju,

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

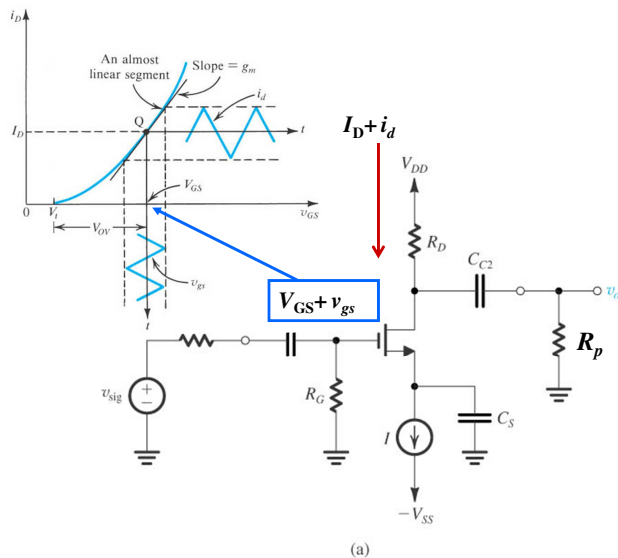
b) DC polarizacija - izvor konstantne struje



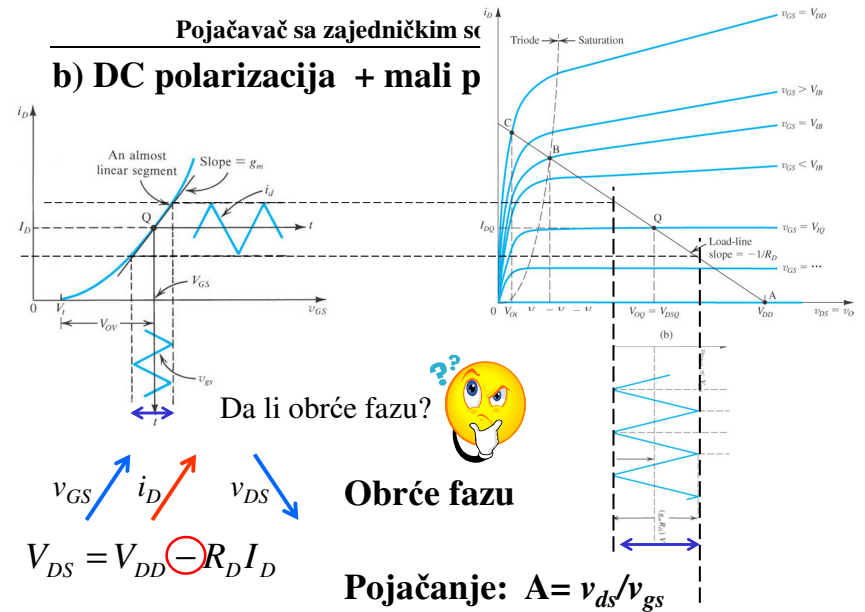
17. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

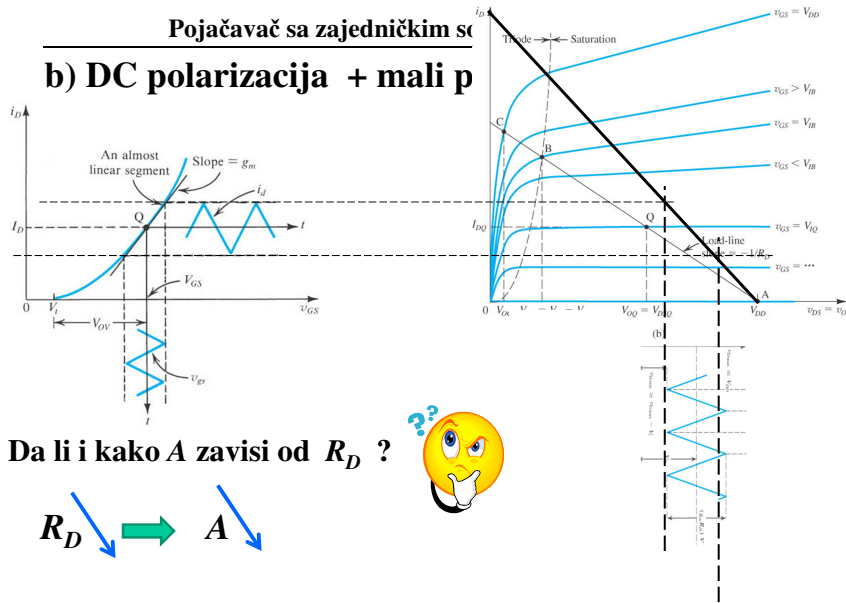
b) DC polarizacija + mali pobudni signal v_{gs}



b) DC polarizacija + mali p



Pojačavač sa zajedničkim sorsom
b) DC polarizacija + mali p

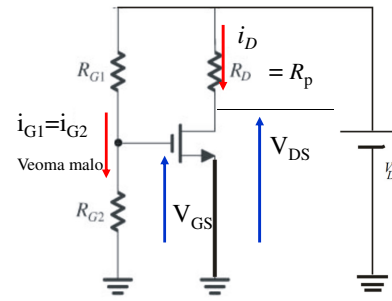


Da li i kako A zavisi od R_D ?



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj $R_p=R_D$

Trenutna snaga na R_D

$$p_{R_D} = R_D i_D^2 = R_D (I_{DM} + i_d)^2$$

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

Srednja snaga na R_D

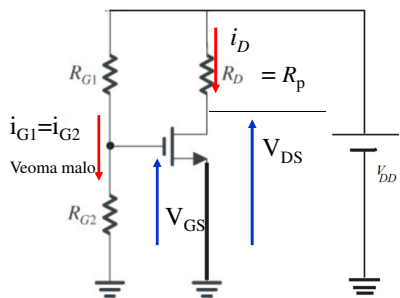
$$P_{R_D} = R_D I_{DM}^2 + R_D I_{Deff}^2$$

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

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

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj

Trenutna snaga na tranzistoru

$$p_T = v_{DS} i_D + v_{GS} i_G = v_{DS} i_D$$

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

Srednja snaga na tranzistoru

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

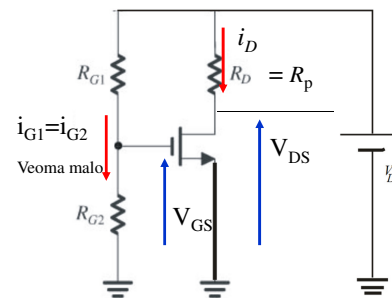
Na tranzistoru se troši najveća snaga u odsustvu signala

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

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

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

c) Odnosi snaga



Najjednostavniji slučaj

Stepen iskorišćenja u odsustvu signala

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

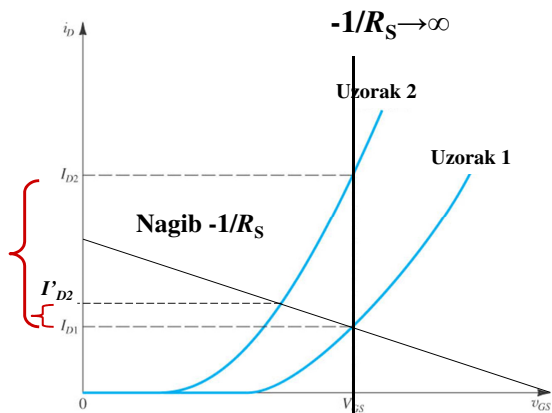
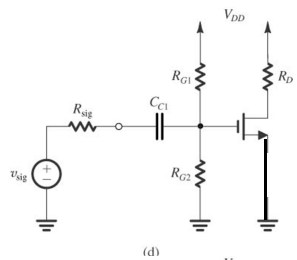
$$\eta = \frac{V_{DD} I_{DM} - V_{DM} I_{DM}}{V_{DD} I_{DM}}$$

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

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

$$\eta = 50\%$$

d) Stabilnost

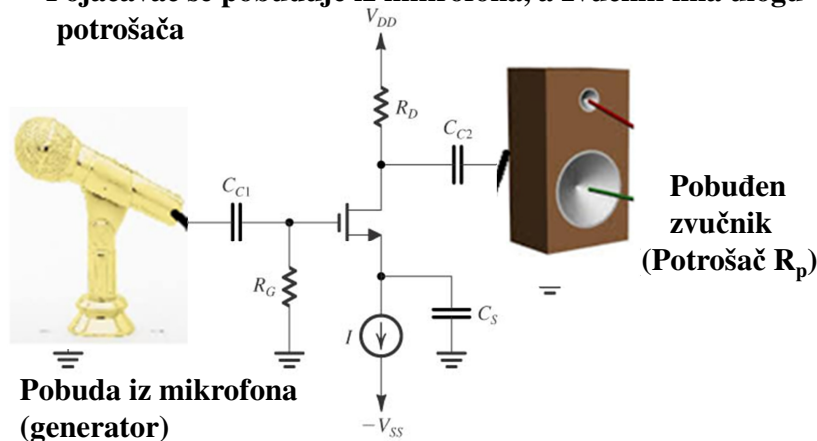


Stabilnost: zavisnost I_D od uzorka tranzistora

$$V_{GS} = V_G - R_S I_D$$

e) Analiza za male signale:

Pojačavač se pobuđuje iz mikrofona, a zvučnik ima ulogu potrošača



Pobuda iz mikrofona (generator)

Pobuđen zvučnik (Potrošač R_p)

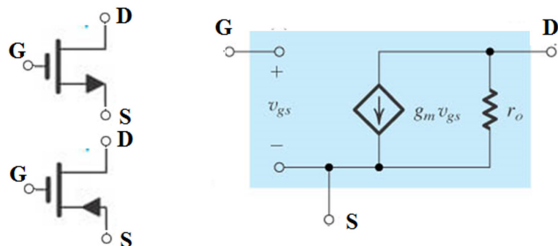
Sadržaj

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



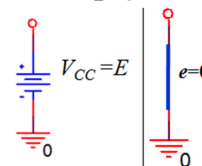
Sadržaj

Važi za SVE konfiguracije:

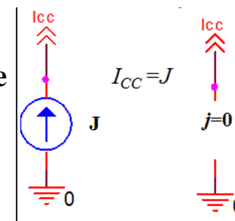
Postupak AC analize (za male signale):

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

b) Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona

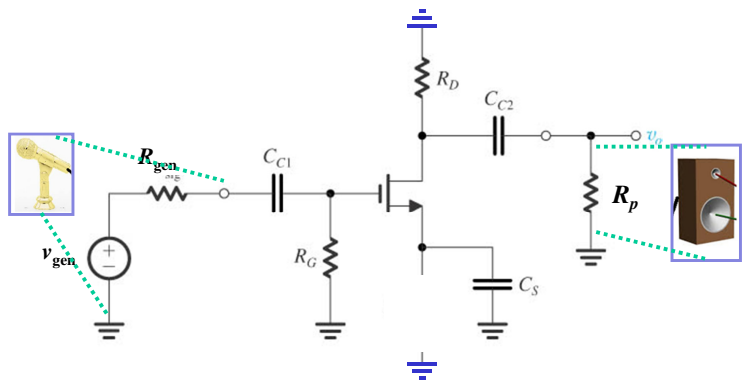


c) Uklonimo DC izvore konstantne struje



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

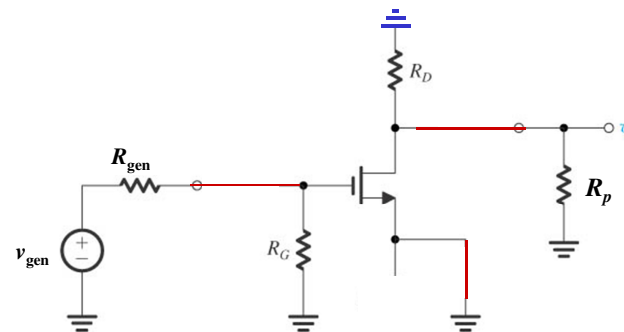
e) Analiza za male signale: zamena dinamičkim modelima V_{DD} i V_{EE} - kratak spoj; I – beskonačna otpornost=prekid



17. novembar 2016. (a) Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

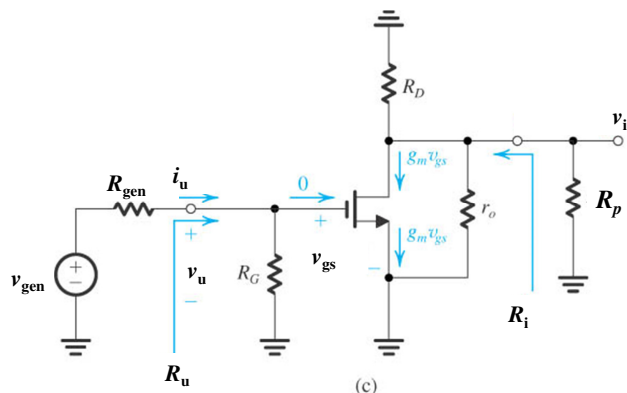
e) Analiza za male signale: C_S i $C_{S1,2}$ kratak spoj



17. novembar 2016. (a) Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

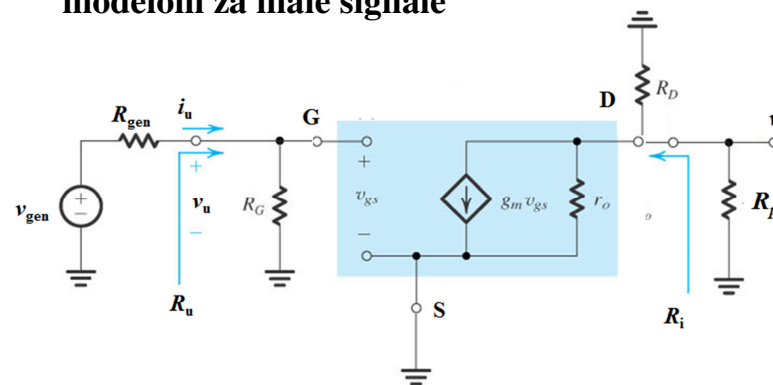
e) Analiza za male signale



17. novembar 2016. (c) Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

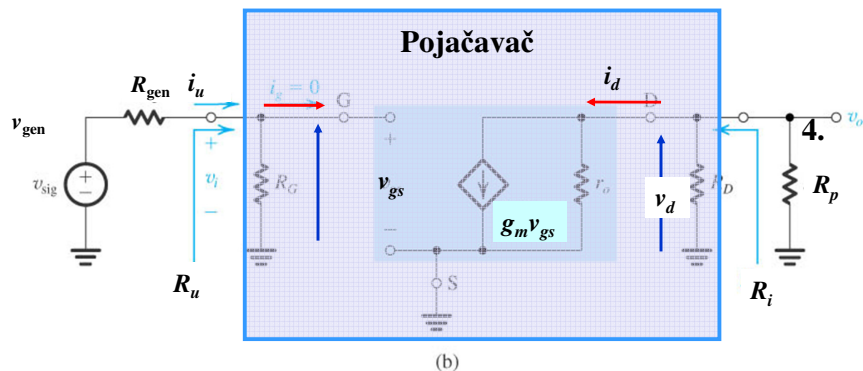
e) Analiza za male signale
Ekvivalentna šema – tranzistor zamenjen modelom za male signale



17. novembar 2016. Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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



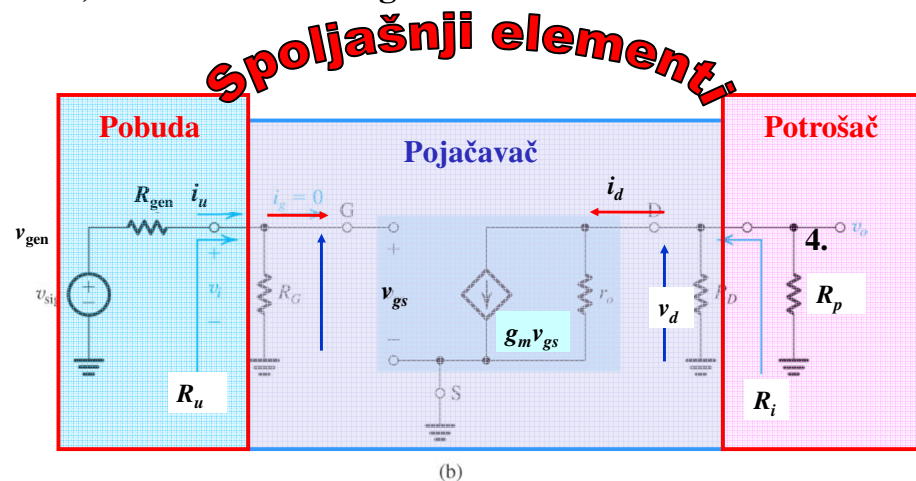
17. novbar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

33

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale:



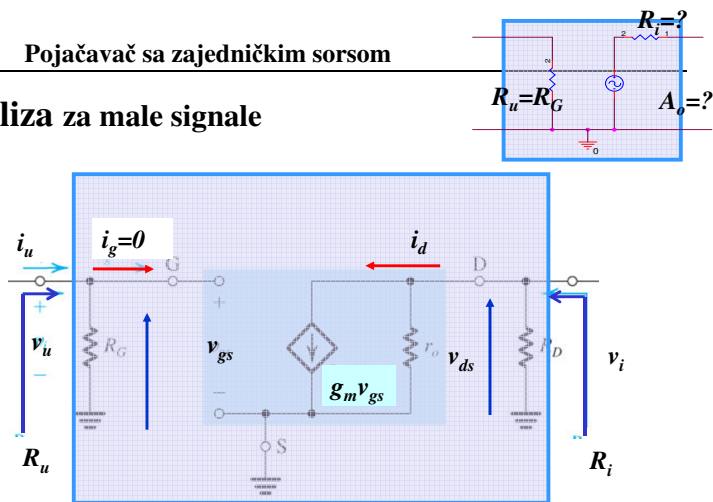
24. novbar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

34

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



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

Obrće fazu

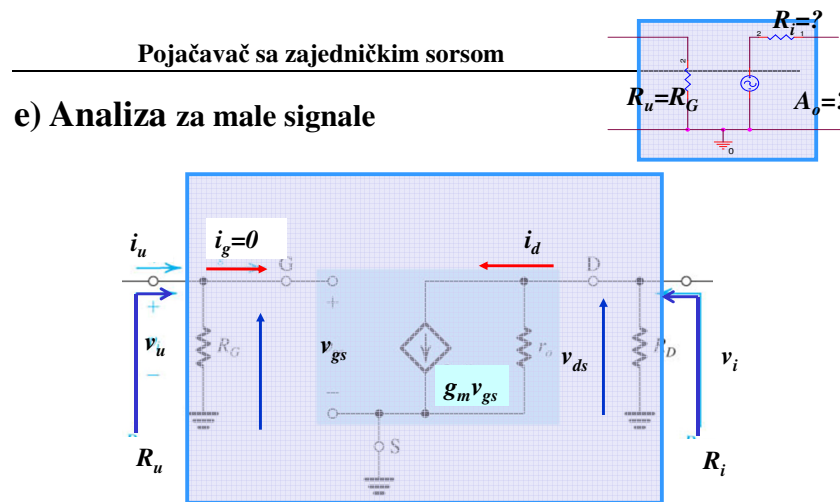
24. novbar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

35

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



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

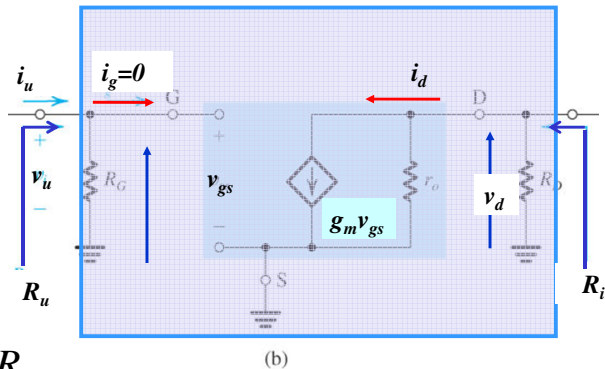
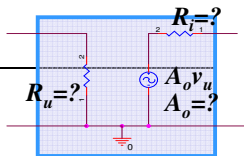
24. novbar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

36

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale

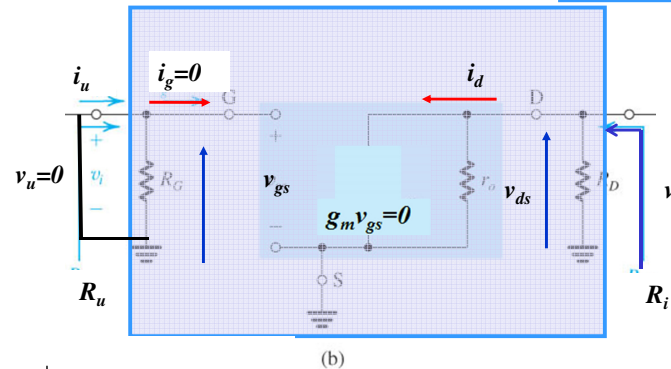
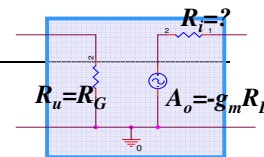


$$R_u = R_G$$

(b)

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale

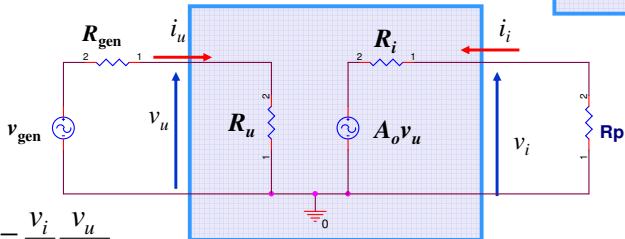
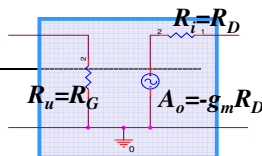


$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0} = (r_o \parallel R_D) \quad \boxed{R_i \approx R_D \text{ za } r_o \gg R_D}$$

(b)

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



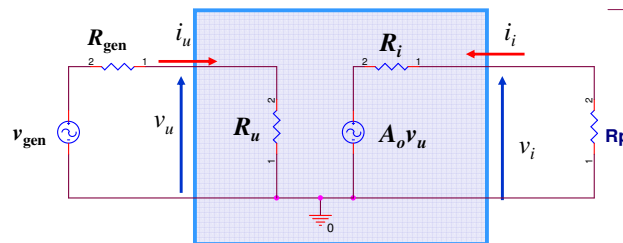
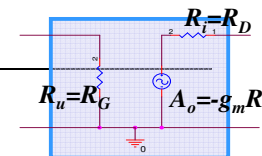
$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}}$$

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

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

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



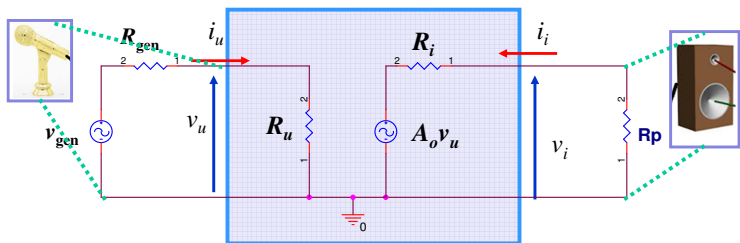
$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{v_i}{v_u} \frac{v_u}{v_{gen}} = \frac{R_p}{R_p + R_i} A_o \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

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

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

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



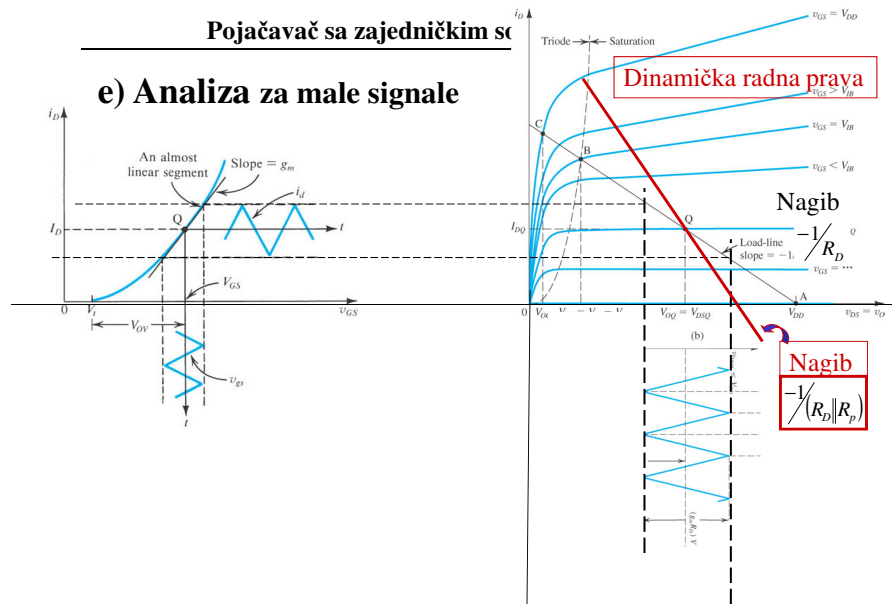
Za slučaj da je $R_G=10\text{M}\Omega$, $R_D=2\text{k}\Omega$, $g_m=10\text{mS}$ ($R_{gen}=600\Omega$, $R_p=8\Omega$)

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

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

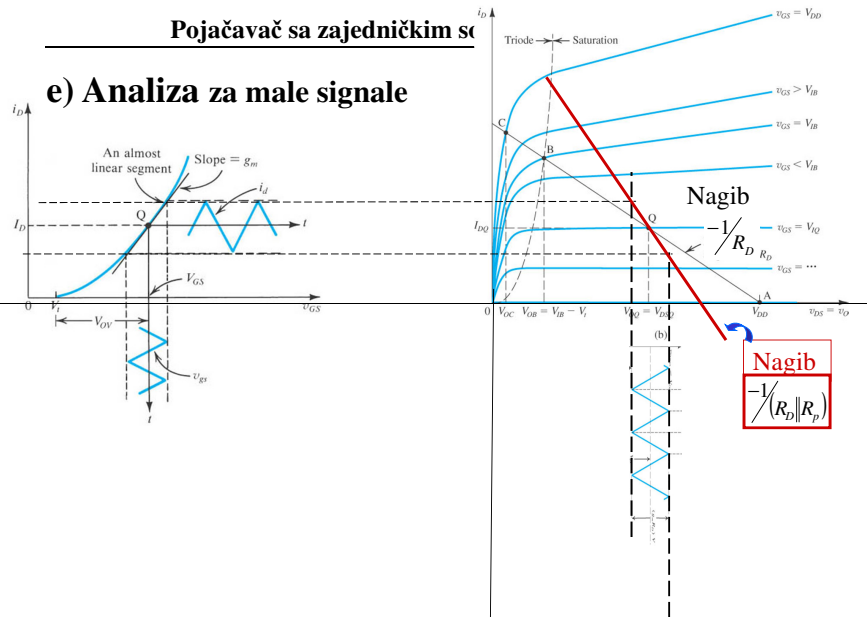
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale



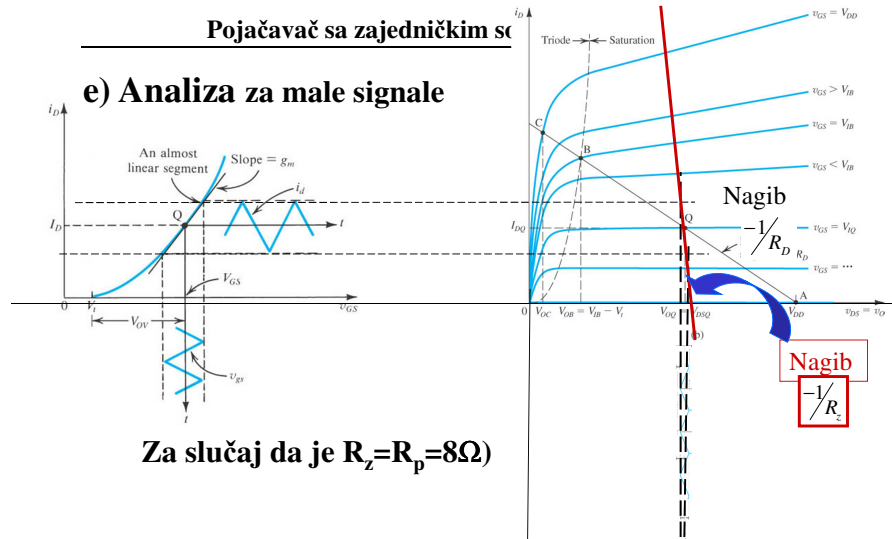
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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

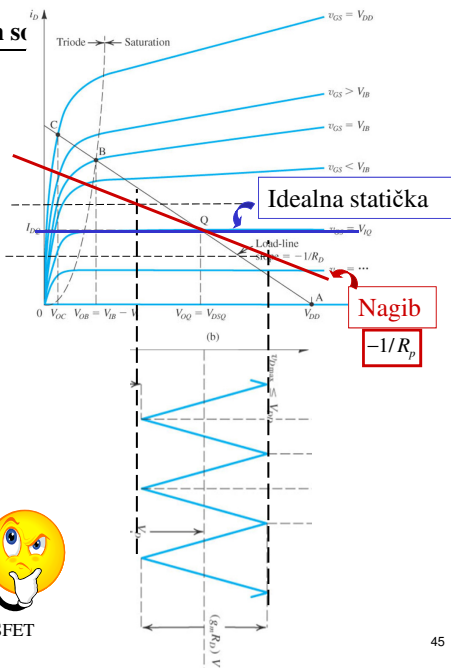
e) Analiza za male signale

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.

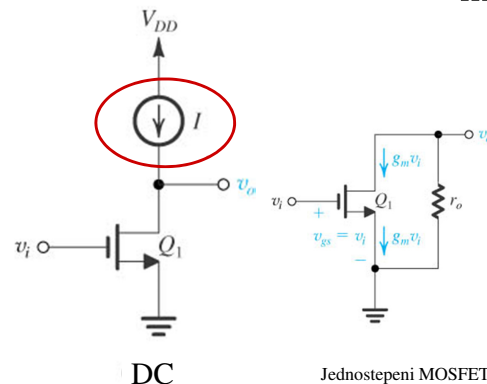
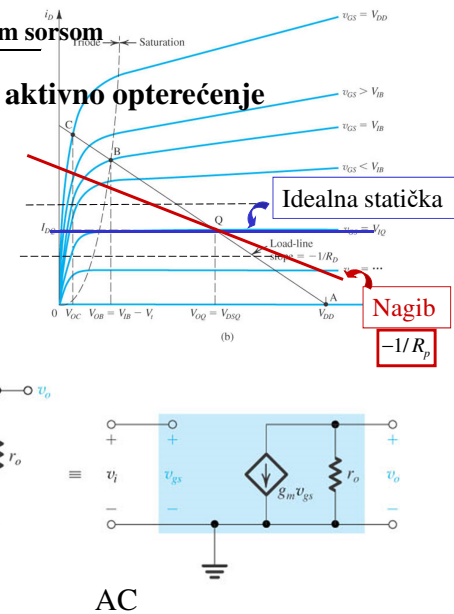
Koji je to element koji propušta DC a ima beskonačnu dinamičku otpornost?



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e) Analiza za male signale – aktivno opterećenje

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

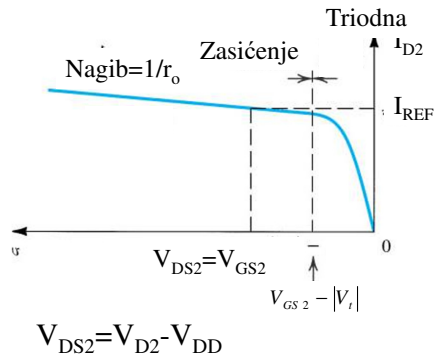
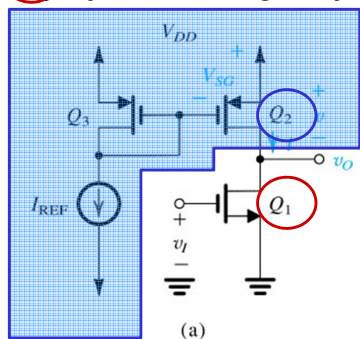


Informativno

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 tranzistoru Q_1 koji radi u konfiguraciji ZS

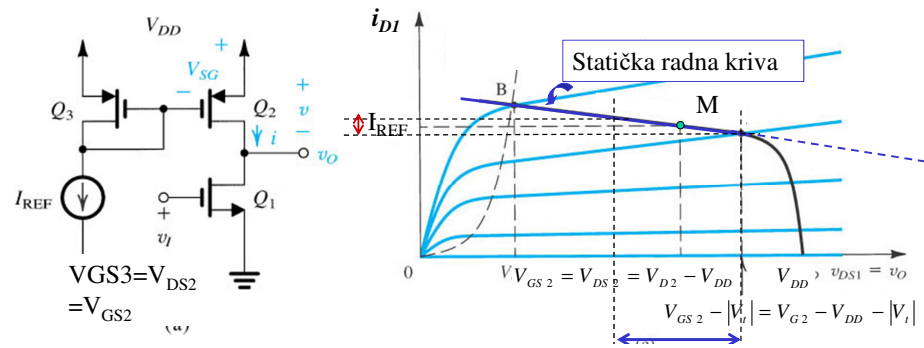


Informativno

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}

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

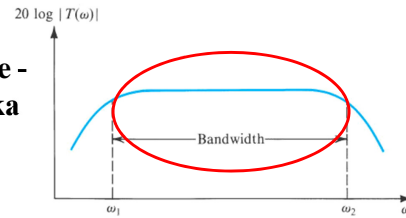
f) Analiza u frekvencijskom domenu

Prethodna analiza:

- Reaktanse svih kondenzatora zanemarene

Rezultat:

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



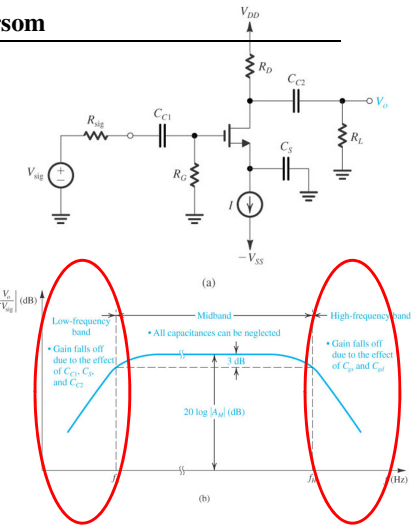
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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)

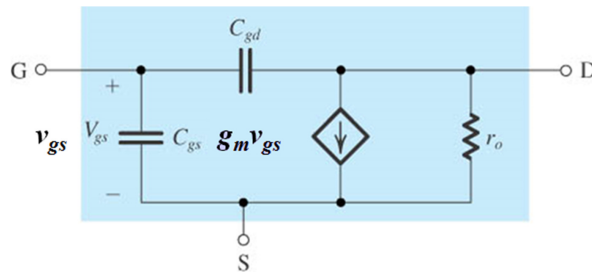
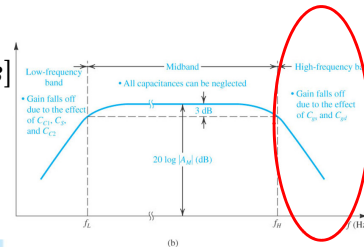


Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

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

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



Informativno

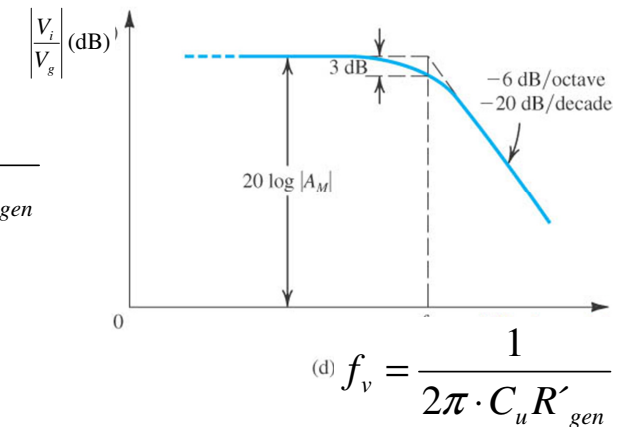
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Gornja granična frekvencija

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

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



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

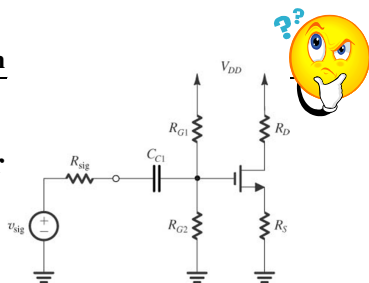
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

Domaći 5.1:

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). ($A_v=-10/11$, $R_{um}=3.73M$, $R_{ic}=10k$, $A_c=10$, $R_{uc}=1.73M$, $R_{ic}=10k$)

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

2. Pojačavač sa zajedničkim gejtom

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

24. novembar 2016.

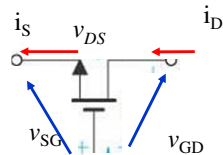
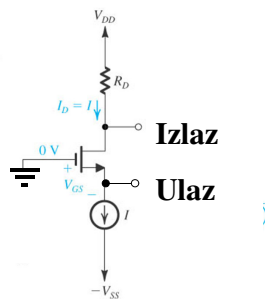
Jednostepeni MOSFET pojačavači

54

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

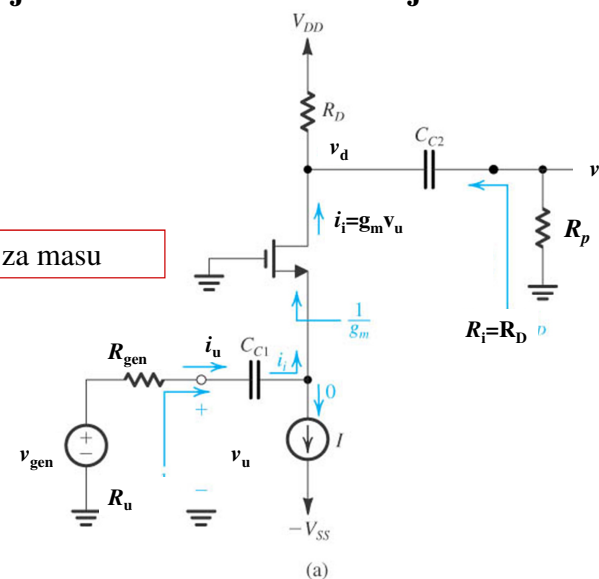


55

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

b) DC polarizacija - izvor konstantne struje

Gejt direktno vezan za masu



(a)

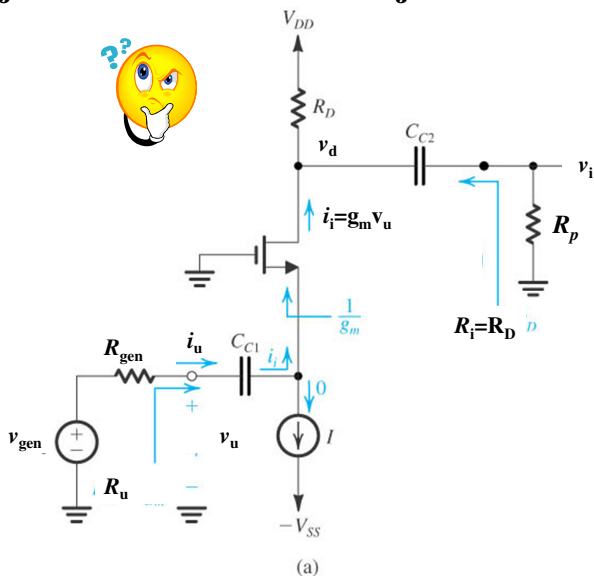
b) DC polarizacija - izvor konstantne struje

Da li obrće fazu?



v_{gen} (blue arrow pointing up)
 v_S (blue arrow pointing up)
 $v_{GS} = v_G - v_S$ (blue arrow pointing down)
 i_D (red arrow pointing down)
 $v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$ (blue arrow pointing up)

NE obrće fazu



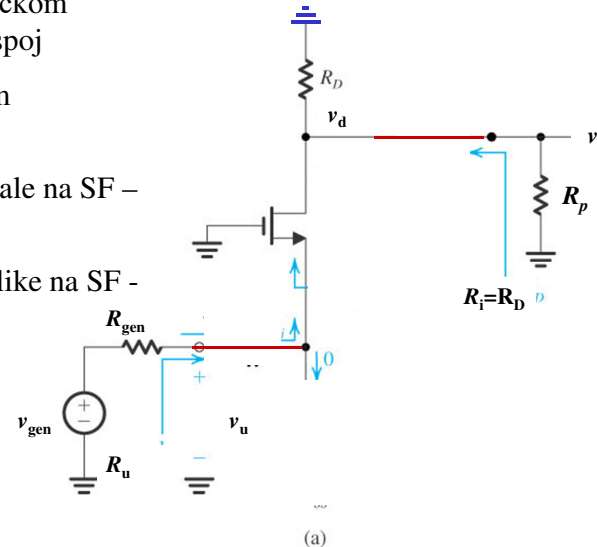
c) Analiza za male signale

VDD zamenjen dinamičkom otpornošću =0; kratak spoj

I zamenjen dinamičkom otpornošću prekid

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

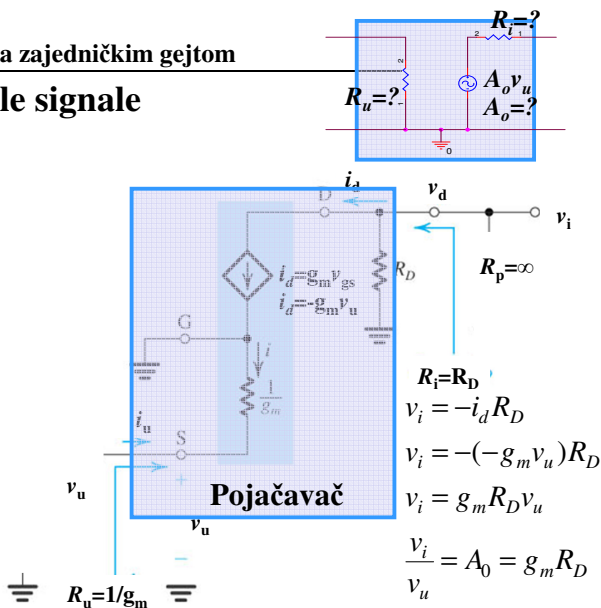
Reaktanse C_{gs} i C_{gd} velike na SF - prekid



c) Analiza za male signale

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

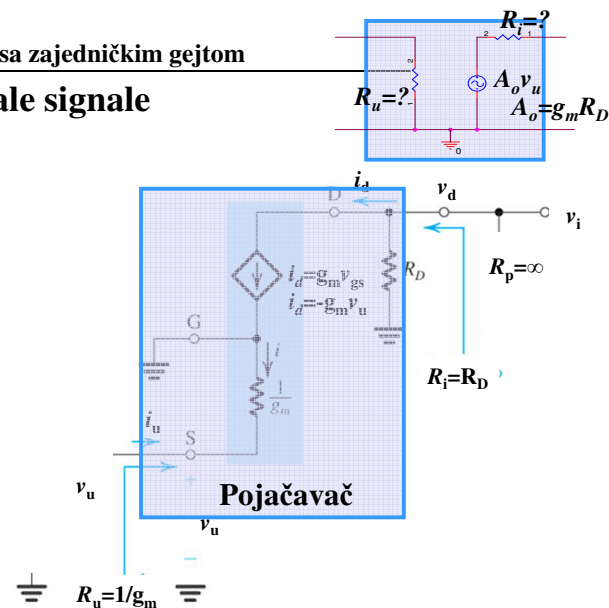
$\frac{v_i}{v_u} = A_0 = g_m R_D$



c) Analiza za male signale

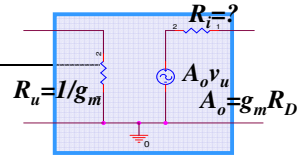
$R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{v_u}{-i_d}$
 $R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{v_u}{-(-g_m v_u)}$
 $R_u = \frac{v_u}{i_u} = \frac{1}{g_m}$

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



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

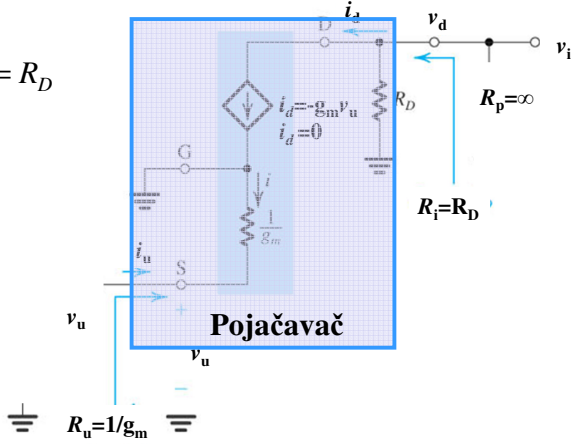
c) Analiza za male signale



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

$$R_i = R_D$$

$$R_i = R_D$$



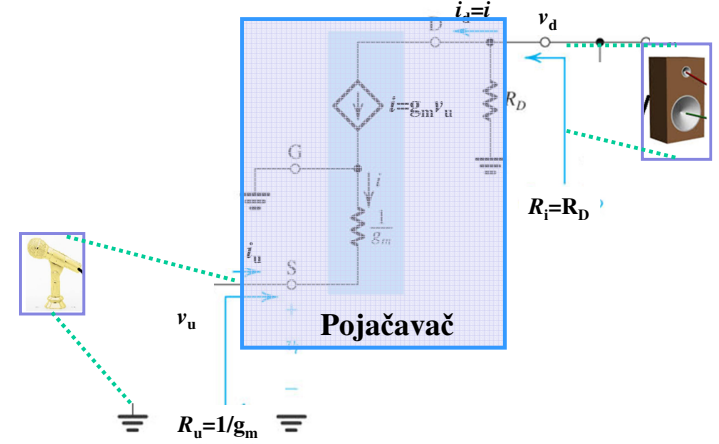
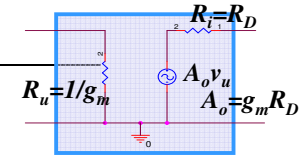
24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

61

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c) Analiza za male signale



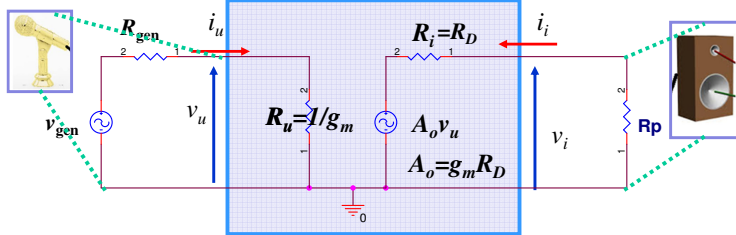
24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

62

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

e) Analiza za male signale



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

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

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

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

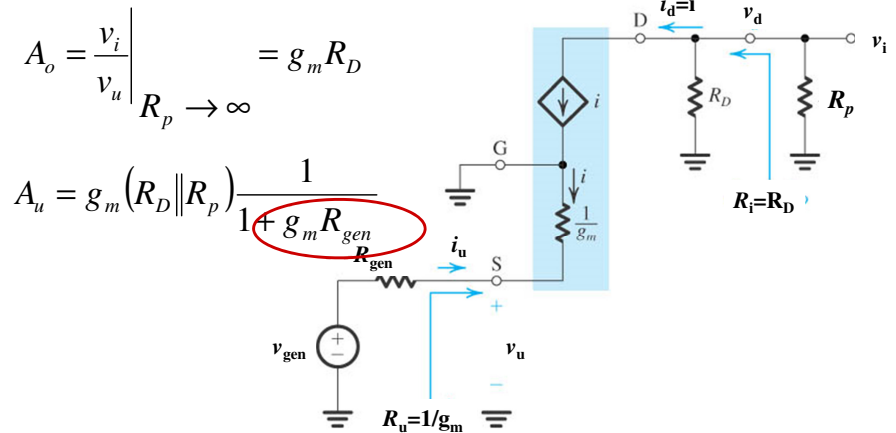
24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

63

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c) Analiza za male signale



Veoma mala ulazna otpornost degradira ukupno naponsko pojačanje kod ZG

64

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	$-g_m (R_D R_p) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} \gg g_m (R_D R_p) \frac{1}{1 + g_m R_{gen}}$	

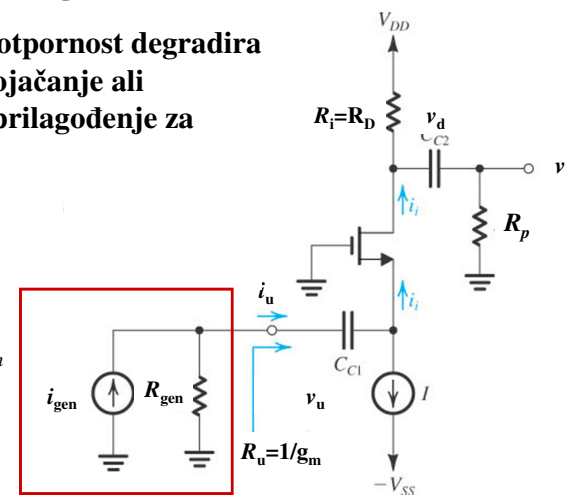
c) Analiza za male signale

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

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

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

$$i_u \approx i_{gen}$$



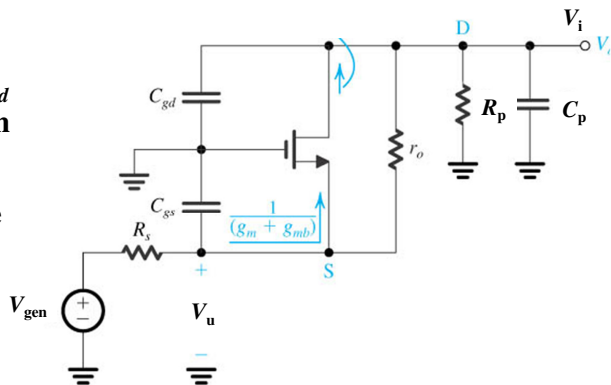
Informativno

d) Frekvencijska analiza

VF

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

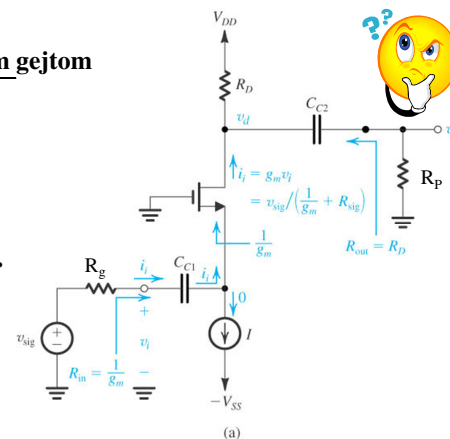
C_{ds} ne dominira jer je naponsko pojačanje malo



f_v mnogo veća nego kod ZS (a)

Domaći 5.2:

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 $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_D=15k$.



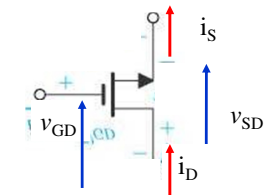
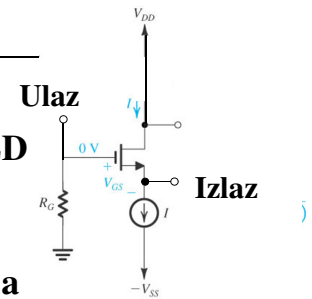
- Odrediti vrednosti jednosmernih napona V_D i V_S . ($V_D=2.5V$, $V_S=-2.5V$)
- Odrediti A_o , R_u , R_i i A_v ukoliko je $R_p=15k$, $R_g=50\Omega$. ($A_o=15V/V$, $R_u=1k$, $R_i=15k$, $A_v=7.5V/V$)
- Odrediti ukupno naponsko pojačanje ukoliko je $R_g=1k$, $10k$, $100k$. ($3.75V/V$, $0.68V/V$, $0.07V/V$)

3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (source follower)

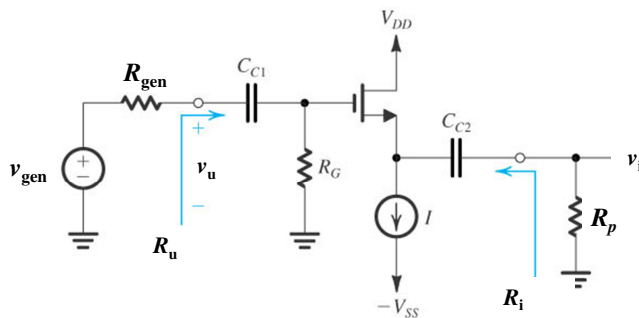
- a. Princip rada
- b. DC polarizacija
- Stabilnost
- c. Analiza za male signale
 - c. Ulazna otpornost
 - d. Pojaćanje
 - e. Izlazna otpornost
- d. Analiza u frekvencijskom domenu

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
- Pojaćava male signale (u okolini radne tačke)
- Ne obrće fazu
- Pojaćavač napona

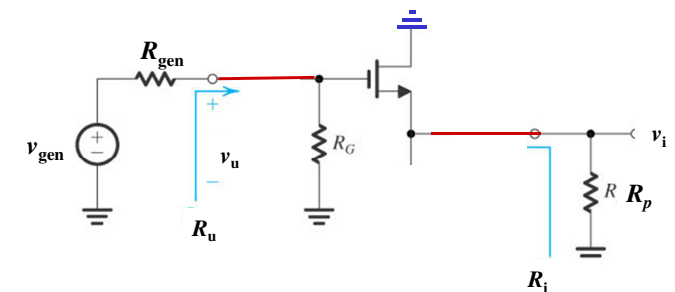


b) DC polarizacija - izvor konstantne struje



c) Analiza za male signale

SF
I i VDD zamenjeni dinamičkim otpornostima;
D kratkospojen za masu.



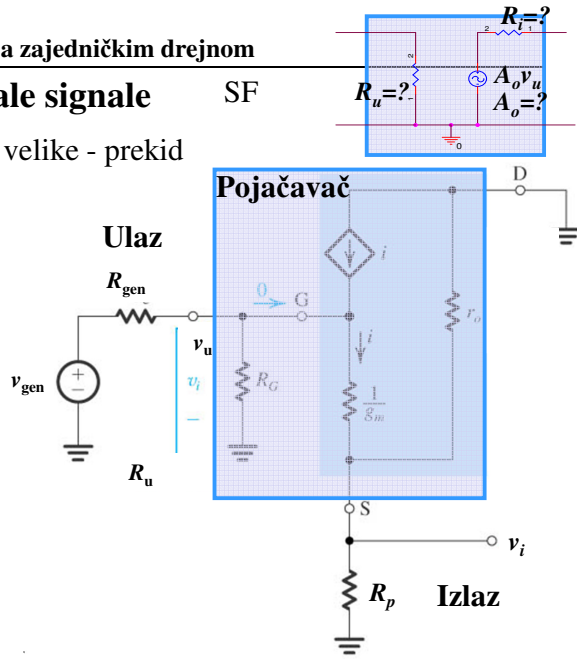
Reaktanse C_{C1} i C_{C2} male na SF

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

SF

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



(b)

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

$$v_g = v_u$$

$$v_i = v_s$$

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

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

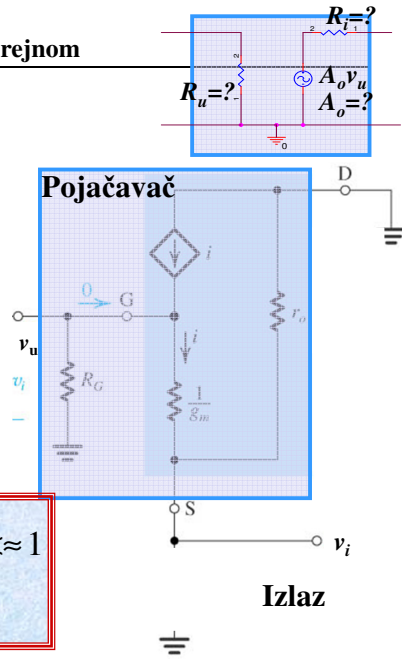
$$v_i = i_d r_o$$

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

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

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

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



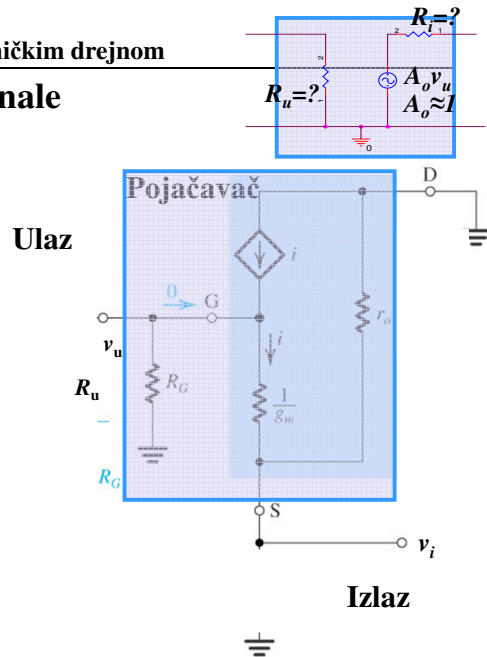
(b)

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

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

$$R_u = R_G$$



(b)

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c) Analiza za male signale

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{v_u=0}$$

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

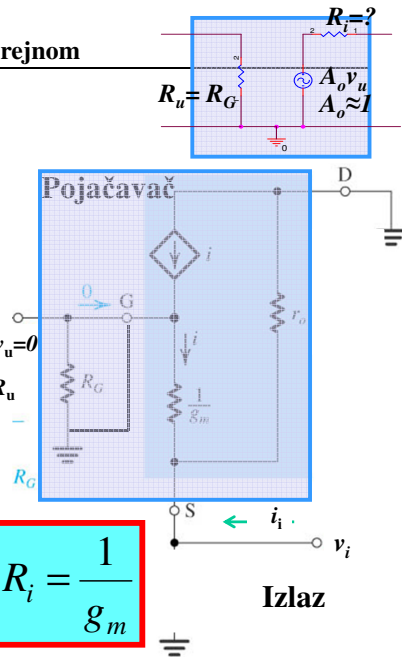
$$i_d = g_m v_{gs} = g_m (v_g - v_s)$$

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

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

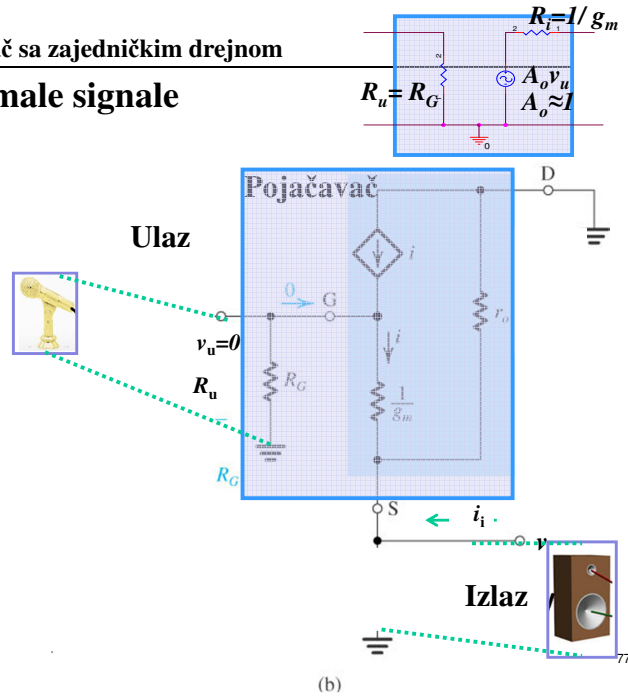
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{v_u=0} = \frac{r_o}{1 + g_m r_o} \approx \frac{r_o}{g_m r_o} = \frac{1}{g_m}$$

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



(b)

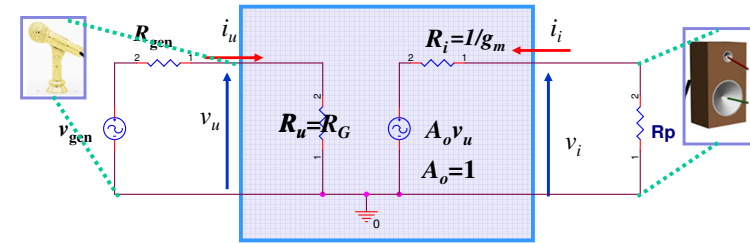
c) Analiza za male signale



24. novembar 2016.

(b)

e) Analiza za male signale



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

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

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

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

24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

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	$-g_m (R_D \parallel R_p) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} \gg 1$	$\frac{R_p}{R_p + 1/g_m} \cdot \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} < 1$

Domaći 5.3:

U kolu sa slike

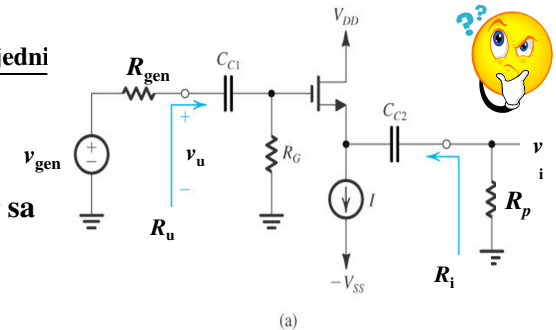
upotrebljen je tranzistor sa

$$V_i=1.5\text{V}, V_A=75\text{V},$$

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

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

$$I_D=0.5\text{mA}, R_G=4.7\text{M}, R_p=15\text{k}.$$



a) Odrediti vrednosti jednosmernih napona V_G i V_S .

$$(V_G=0\text{V}, V_S=-2.5\text{V})$$

b) Odrediti A_o , R_u , R_i i A_v ukoliko je $R_G=1\text{M}\Omega$.

$$(A_o=0.993\text{V/V}, R_u=4.7\text{M}, R_i=0.993\text{k}, A_v=0.768\text{V/V})$$

24. novembar 2016.

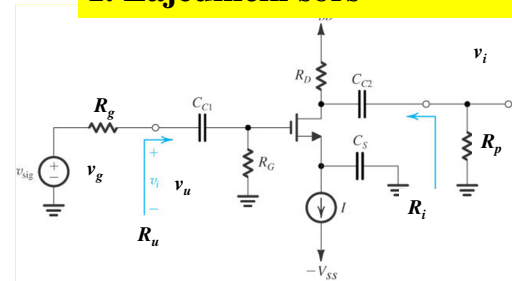
Jednostepeni MOSFET pojačavači

Rezime:

- **Tranzistori rade u zasićenju:**
 $V_{GS} > V_t$; $V_{DS} > V_{GS} - V_t$
- **Za male signale**
 tranzistor se ponaša kao 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)

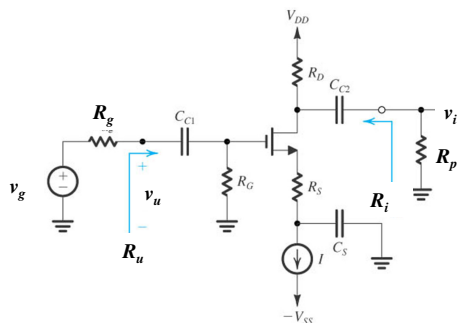
$A \approx -g_m (R_D \parallel R_p)$

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

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

Rezime:

1.a Zajednički sors sa otpornikom u sorsu



$R_u = R_G$

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

$R_i \approx R_D$

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

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;

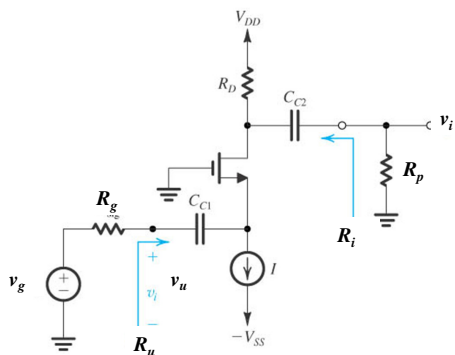
Relativno velika izlazna otpornost;

Otpornost R_S stabilizuje radnu tačku i popravlja amplitudsku karakteristiku ali smanjuje naponsko pojačanje

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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)

$A_u \cong g_m \frac{(R_D \parallel R_p)}{1 + g_m R_g}$

Jednostepeni pojačavači sa MOST

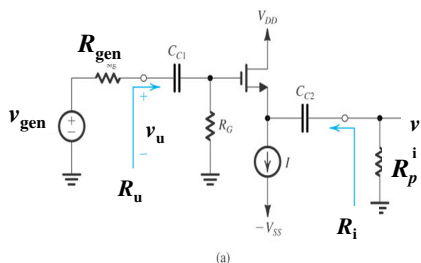
Rezime:

- 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)

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

3. Zajednički drejtn



$R_u = R_G$ (reda MΩ) veliko

$A_0 = \frac{r_o}{r_o + 1/g_m} \ll 1$

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

$R_i \approx \frac{1}{g_m}$ (reda x10-100Ω) malo!!!

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

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

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



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 ZG i ekvivalentno kolo za male signale na SF.
- Električna šema, princip rada pojačavača sa ZD i ekvivalentno kolo za male signale na SF.

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



Ispitna pitanja?

1. U polju karakteristika (I_D - V_{GS} i I_D - V_{DS}) nMOST-a u konfiguraciji pojačavača sa ZS napisati izraze koji određuju položaj radne tačke i radne prave i označiti ih na slici.
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. Objasniti odnos faza izlaznog i ulaznog napona kod pojačavača sa ZS.
4. Odrediti izraze za naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača u konfiguraciji 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 ZG.
8. Odrediti izraze za naponsko pojačanje neopterećenog pojačavača, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača u konfiguraciji sa ZD.
9. Objasniti odnos faza izlaznog i ulaznog napona kod pojačavača sa ZD.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

Sledećeg časa

Jednostepeni pojačavači sa BJT

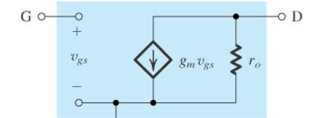
Model MOS tranzistora



Rešenje 4.1

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; b) napon V_{DS} u funkciji V_{GS} pri kome tranzistor ulazi u zasićenje; 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; d) nacrtati model i upisati vrednosti parametara;

- $V_{GS} > V_t = 1V$;
- $V_{DS} > V_{GS} + V_t = V_{GS} + 1V$;
-



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

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

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{0,35} = 424 \mu A/V < g_{mBJT} = 40mA/V \quad \text{e)}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0,02 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 666,66k\Omega \approx 0,67M\Omega$$

Model bipolarnog tranzistora



Rešenje 4.2

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

Nacrtati hibridni π i T model i odrediti parametre:

a) g_m ; b) r_π ; c) r_o ; d) α ; f) r_e u radnoj tački. g) Uporediti g_m sa odgovarajućim parametrom MOSFETa sa slajda 39. (40mA/V; 2.5k Ω ; 105k Ω ; 100/101; 25 Ω .)

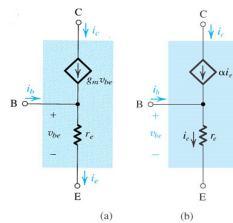
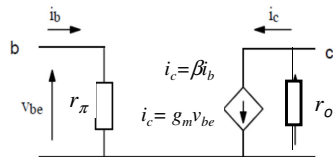
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0.026V} = 38,4mA/V \approx 40mA/V$$

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

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

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

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



12. novembar 2012.

Modeli poluprovodničkih
komponenta

93