


Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (26.11.2018.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2019.)	50%	20%
<hr/>		
	120%	60%

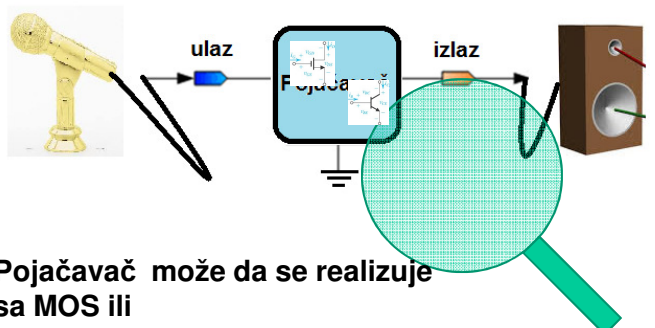


Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

13. novembar 2018. 1

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



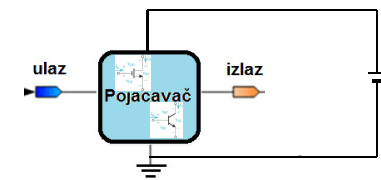
Pojačavač može da se realizuje sa MOS ili BJT tranzistorima

13. novembar 2018. 2

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

Generalno, rad svih tipova pojačavača sagledavamo sa stanovišta:

- 1) stvaranja uslova da radi – DC polarizacija;
- 2) pojačavanja malih signala – AC režim rada

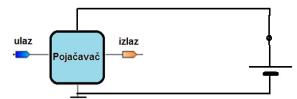


13. novembar 2018. 3

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

DC

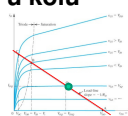
Treba obezbedi jednosmerno napajanje tako da mirna radna tačka bude na poziciji u kojoj se dobija željeno pojačanje uz minimalna izobličenja.



Mirnu radnu tačku određuju:

- a) vrednosti otpornosti i DC generatora u kolu t.j. radna prava na primer $V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$ i
- b) I-V karakteristike aktivnih elemenata u kolu na primer

Mirna radna tačka nalazi se na preseku Radne prave i I-V karakteristike aktivnog elementa



13. novembar 2018. 4

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

DC
 Da bi se odredio položaj mirne radne tačke (V_{CE} , I_C , V_{BE} , I_B) (V_{DS} , V_{GS} , I_D), neophodna je DC analiza.
 Poluprovodničke komponente zameniti modelima za velike signale

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 5

DC
 Za pojačavače realizovane na bazi MOST

MOST: mora da radi u oblasti zasićenja:
 $v_{GS} > V_t$; $v_{DS} > v_{GS} - V_t$

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 6

DC
 Za pojačavače realizovane na bazi BJT

BJT: mora da radi u aktivnoj oblasti:
B-E spoj direktno; *B-C spoj inverzno*

	NPN	PNP
BE direktno	$V_B > V_E$	$V_B < V_E$
BC inverzno	$V_B < V_C$	$V_B > V_C$
Značenje	$V_C > V_B > V_E$	$V_C < V_B < V_E$

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 7

DC analiza (model za velike signale)
 kada se utvrde DC struje i naponi, mogu da se izračunaju dinamički parametri (g_m , r_π , R_o , h_{1D} , h_{2D} , ...) aktivnih elemenata (modeli za male signale) neophodni za AC analizu

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad \beta = r_\pi \cdot g_m = \frac{I_C}{I_B}$$

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 8

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

a) Poluprovodničke komponente zameniti AC modelima

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 9

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

a) Poluprovodničke komponente zameniti AC modelima
 b) DC izvori napona → kratak spoj
 c) DC izvori struje → prekid

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 10

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

a) Poluprovodničke komponente zameniti AC modelima
 b) DC izvori napona → kratak spoj
 c) DC izvori struje → prekid
 d) Naći pojačanje A_o , R_u i R_i neopterećenog pojačavača

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 11

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

a) Poluprovodničke komponente zameniti AC modelima
 b) DC izvori napona → kratak spoj
 c) DC izvori struje → prekid
 d) Naći pojačanje A_o , R_u i R_i neopterećenog pojačavača
 e) Zameniti model pojačavača u kolu i priključiti AC pobudu i potrošač

13. novembar 2018. Uvod <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 12

Osnovni pojačavački stepeni sa MOSFET

13

Osnovne osobine MOS tranzistora

Sadržaj:

1. Polarizacija 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

13. novembar 2018.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

14

Osnovne osobine MOS tranzistora

MOSFET – transkonduktanski pojačavač:

- Tranzistor radi u oblasti zasićenja:

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

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

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

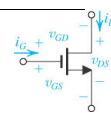
$$i_G = 0$$

- 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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači

15



Sadržaj

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

13. novembar 2018.

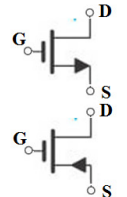
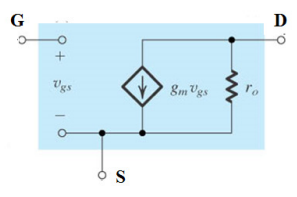
Jednostepeni pojačavači sa BJT

16

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

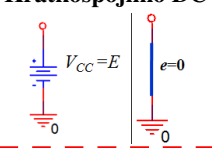



13. novembar 2018.
Jednostepeni pojačavači sa BJT
17

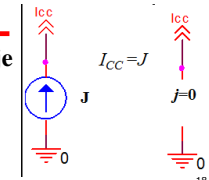
Sadržaj

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



13. novembar 2018.
Jednostepeni pojačavači sa BJT
18

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

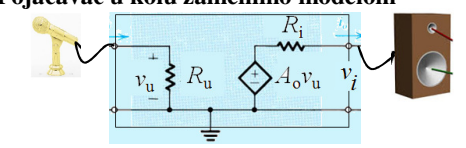
17. novembar 2015.
Jednostepeni pojačavači sa BJT
19

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



13. novembar 2018.
Jednostepeni pojačavači sa BJT
20

Analiza za male signam

Odredimo ukupno pojačanje

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

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

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

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 21

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 22

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 23

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 24

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada: DC + mali pobudni signal v_{gs}

An almost linear segment Slope = g_m

$$i_D = A \cdot (v_{GS} - V_T)^2 = A \cdot v_{OV}^2$$

$$I_D + i_d \quad i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

$$V_{GS} + v_{gs}$$

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

(a)

25

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada: DC + v_{gs}

An almost linear segment Slope = g_m

Da li obrće fazu? 🤔

Obrće fazu

$v_{GS} \nearrow \quad i_D \nearrow \quad v_{DS} \searrow$

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

Pojačanje: $A = v_{ds}/v_{gs}$

(b)

26

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada: DC + v_{gs}

An almost linear segment Slope = g_m

Da li i kako A zavisi od R_D ? 🤔

$R_D \rightarrow A$

Pojačanje direktno proporcionalno sa R_D

(b)

27

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada:

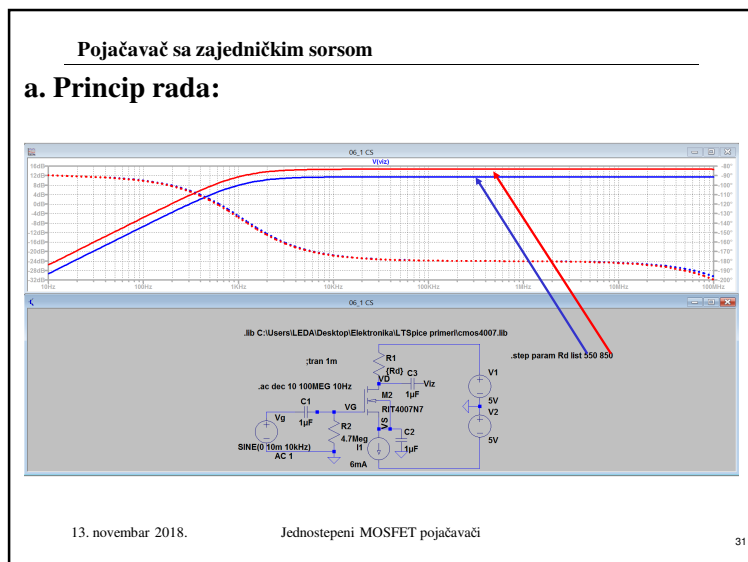
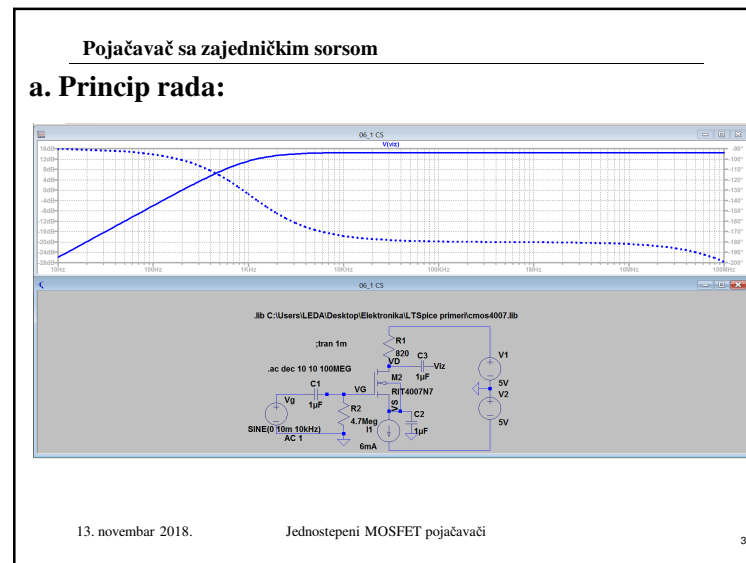
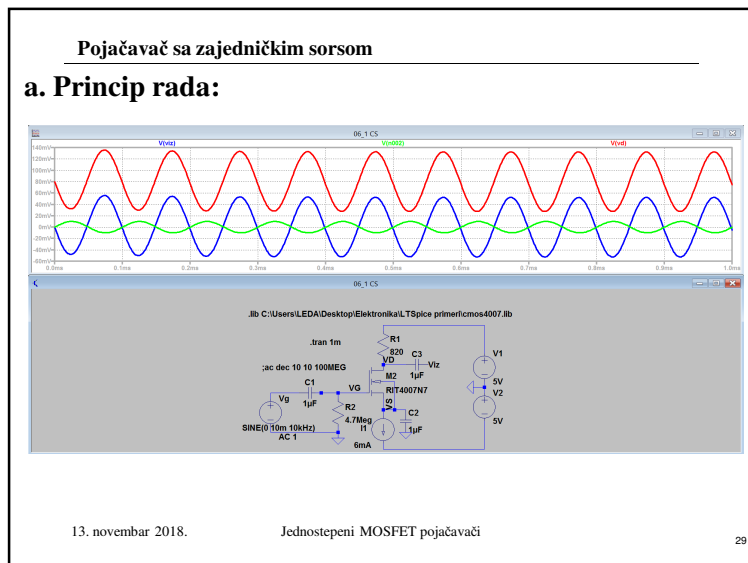
```

.tran 1m
;ac dec 10 10 100MEG
Vg SINE(0 10m 10kHz) AC 1
R1 820
C1 1uF
R2 4.7Meg
C2 1uF
R3 6mA
C3 1uF
M2 RIT4007N7
V1 5V
V2 5V

```

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači

28



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.1 DC polarizacija sa R_G

$I_G = 0$

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

Veoma malo

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

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

Obezbediti rad u oblasti zasićenja:

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

$$I_D = 0$$

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

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

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

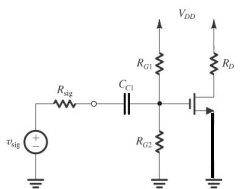
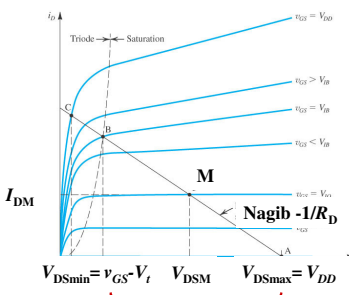
$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 32

Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.1 DC polarizacija sa R_G

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}

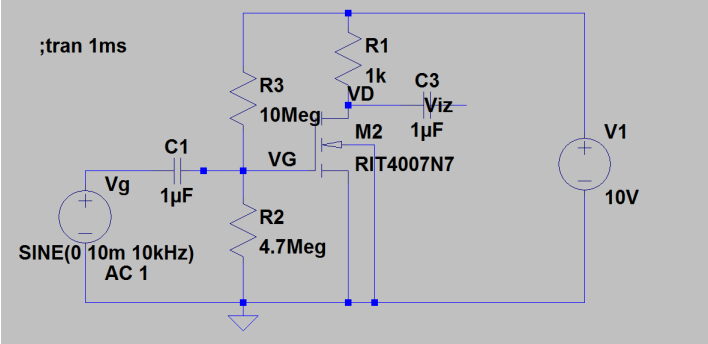
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.1 DC polarizacija sa R_G

```

.lib C:\Users\LEDA\Desktop\Elektronika\LTSpice primeri\cmos4007.lib
;tran 1ms

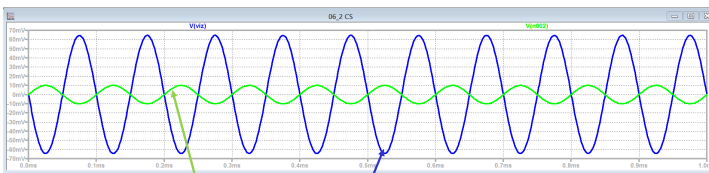
```



34

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

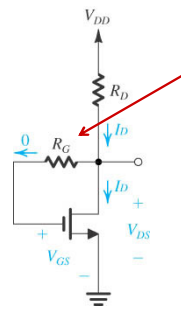
b.1 DC polarizacija sa R_G



35

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.2 DC polarizacija - otpornik G-D



$V_{GS} = V_{DS}$, Zašto? 🤔

Šta to znači?

Tranzistor uvek u zasićenju,

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

36

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.3 DC polarizacija - izvor konstantne struje

$I_{REF} = I_{D1} = \frac{1}{2} k_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS} - V_t)^2$
 $I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 = I$
 $I = I_{D2} = \frac{1}{2} k_n \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{GS} - V_t)^2$
 $I = I_{REF} \left(\frac{W/L_2}{W/L_1}\right)$

$V_G = ?$
 $V_G = 0$
 $V_S = ?$
 $V_S < -V_t$
 $V_{GS} = \sqrt{\frac{I}{A}} + V_t = V_G - V_S = 0 - V_S = -V_S$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 37

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c. Odnosi snaga

Najjednostavniji slučaj $R_p = R_D$
Trenutna snaga na R_D
 $p_{R_D} = R_D i_D^2 = R_D (I_{DM} + i_d)^2$
 $P_{R_D} = R_D I_{DM}^2 + R_D i_d^2 + 2R_D I_{DM} i_d$
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_D .

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

13. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 38

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

c. Odnosi snaga

Najjednostavniji slučaj
Trenutna snaga na tranzistoru
 $p_T = v_{DS} i_D + v_{GS} i_G \stackrel{0}{=} v_{DS} i_D$
 $p_T = (V_{DD} - R_D i_D) i_D = V_{DD} i_D - R_D i_D^2$
Srednja snaga na tranzistoru
 $P_T = P_d = P_{DD} - P_{R_D}$

Na tranzistoru se troši najveća snaga u odsustvu signala

$P_{T \max} = P_{DD} - P_{R_{D \min}} = P_{DD} - R_D I_{DM}^2 = V_{DD} I_{DM} - R_D I_{DM}^2$
 $P_{T \max} = (V_{DD} - R_D I_{DM}) I_{DM} = V_{DSM} I_{DM}$

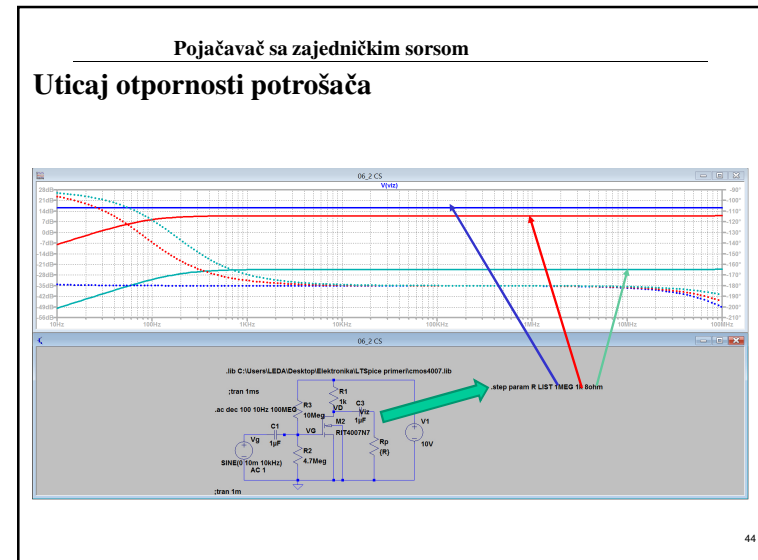
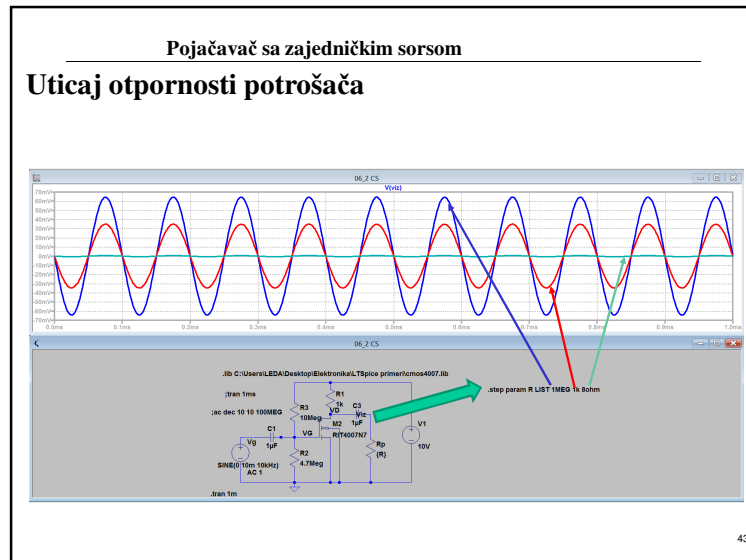
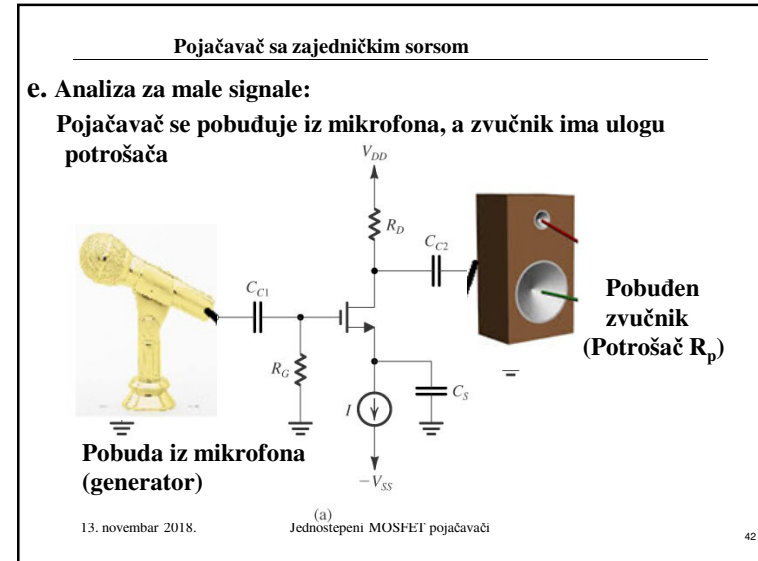
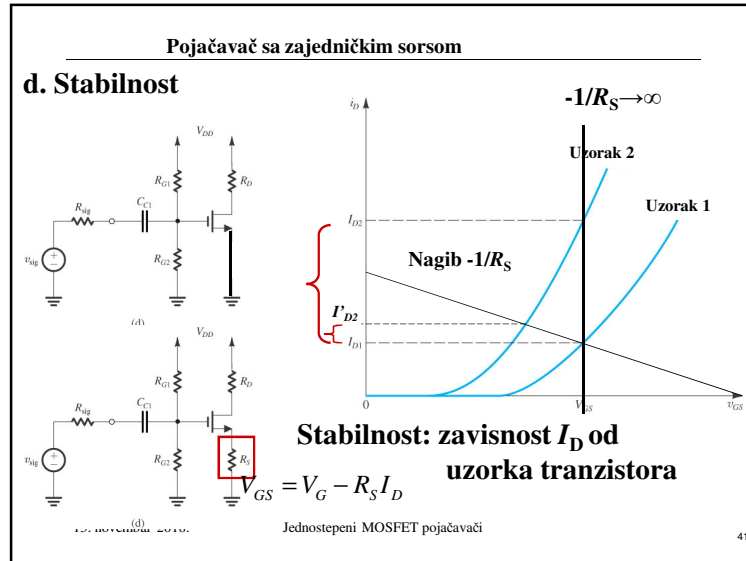
13. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 39

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 $V_{DM} = V_{DD}/2$
 $\eta = 50\%$

13. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 40



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

13. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 45

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

13. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 46

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

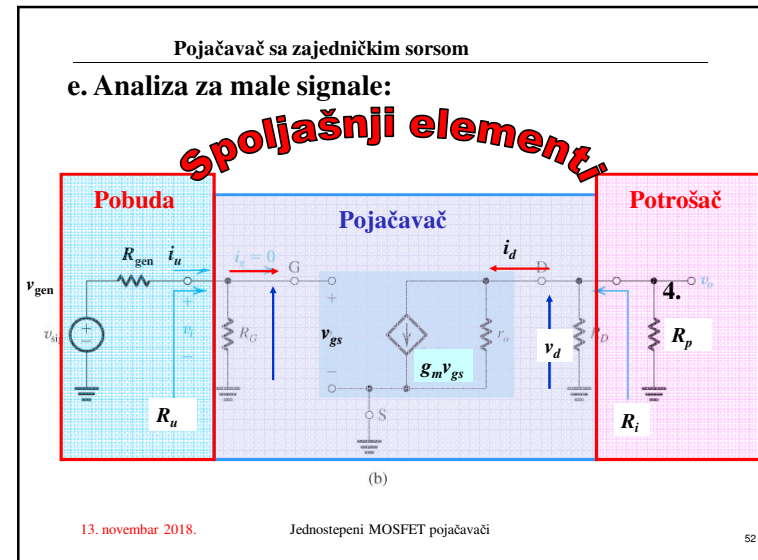
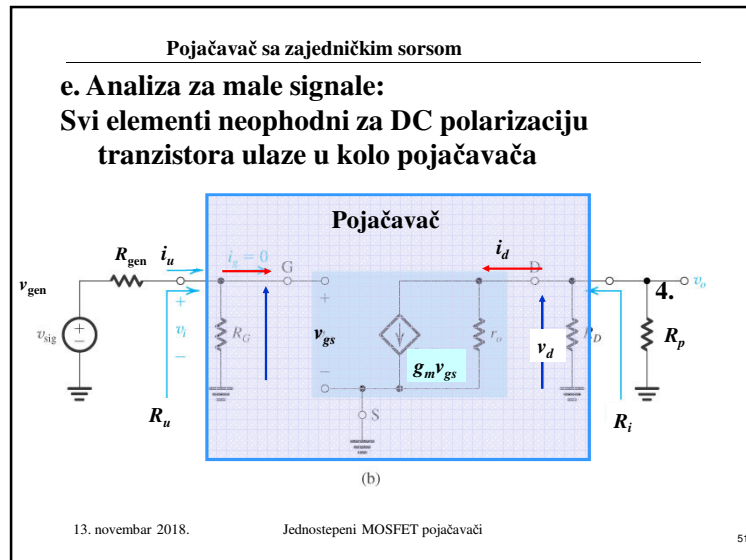
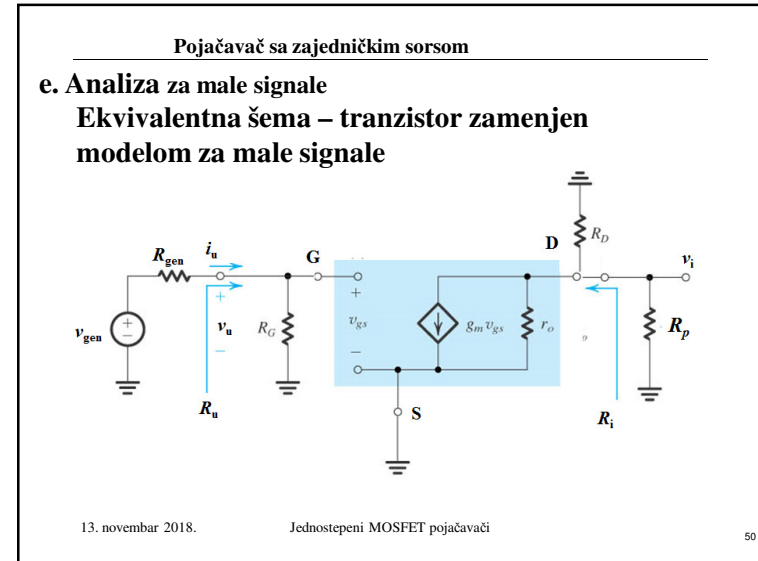
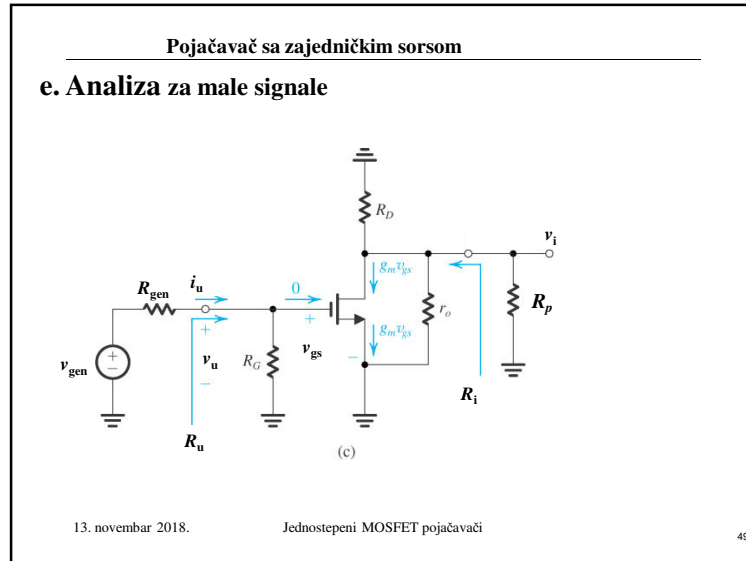
e. Analiza za male signale: zamena dinamičkim modelima
 V_{DD} i V_{EE} - kratak spoj; I – beskonačna otpornost=prekid

(a)
 13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 47

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale: C_S i $C_{S1,2}$ biraju se tako da Z_{C_S} na SF bude vrlo malo – kratak spoj

(a)
 13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 48



Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $R_o = ?$ $A_o = ?$

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

Obrće fazu

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 53

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $R_o = ?$ $A_o = ?$

$$A_o = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = -g_m (r_o \parallel R_D)$$

$A_o \approx -g_m R_D$ za $r_o \gg R_D$

Pojačanje direktno proporcionalno sa R_D

13. novembar 2018. 54

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = ?$ $A_o v_u = ?$ $A_o = ?$

$$R_u = R_G$$

(b)

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 55

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $A_o = g_m R_D$

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

$R_i \approx R_D$ za $r_o \gg R_D$

eni MOSFET pojačavači

56

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

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

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 57

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

$$A_u = \frac{v_i}{v_{gen}} = \frac{R_p}{R_p + R_D} (-g_m R_D) \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} \approx -\frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m$$

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 58

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

$$A_o = -g_m R_D = -20$$

$$A_u = -\frac{R_p}{R_p + R_D} (A_o) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} = -\frac{R_p}{R_p + R_D} (g_m R_D) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}$$

$$A_u \approx -\frac{R_p}{R_p + R_D} (g_m R_D) \approx -\frac{8}{2008} \cdot 20 \approx -10 \cdot 10^{-3} \cdot 8 = -0.08$$

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 59

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

Dinamička radna prava

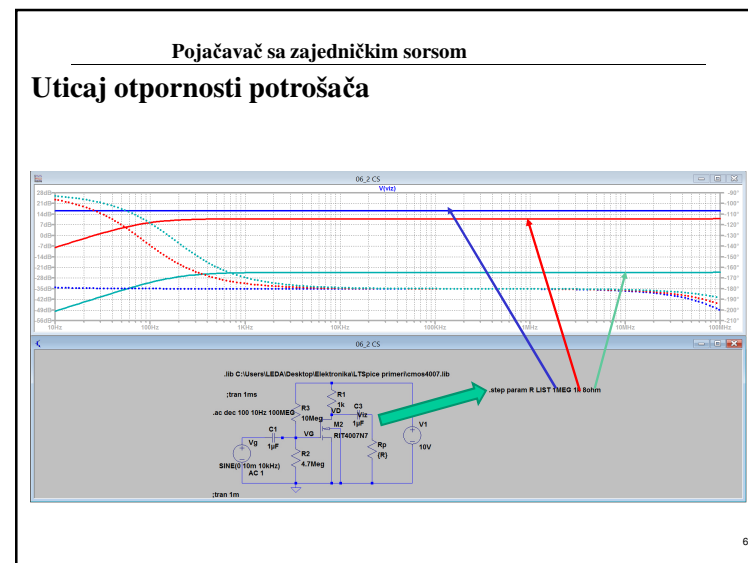
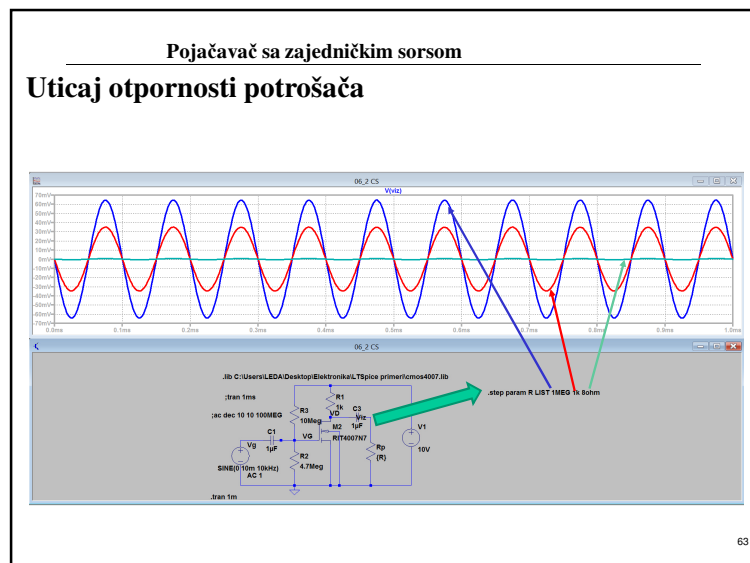
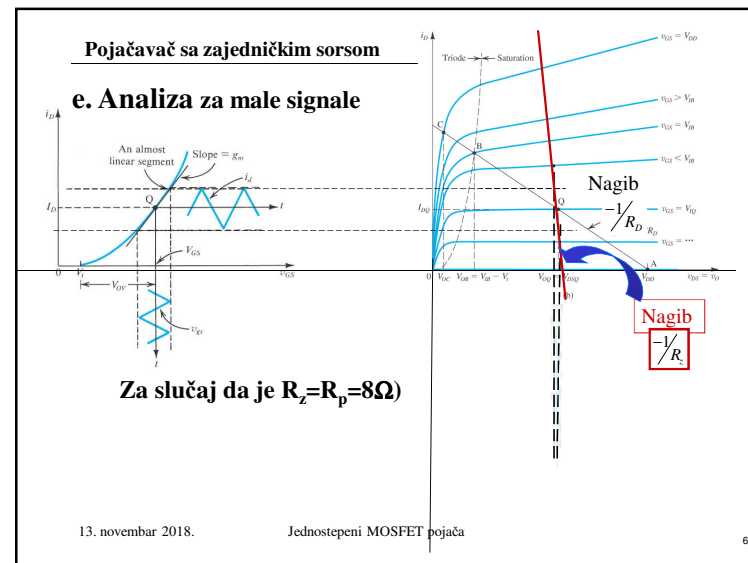
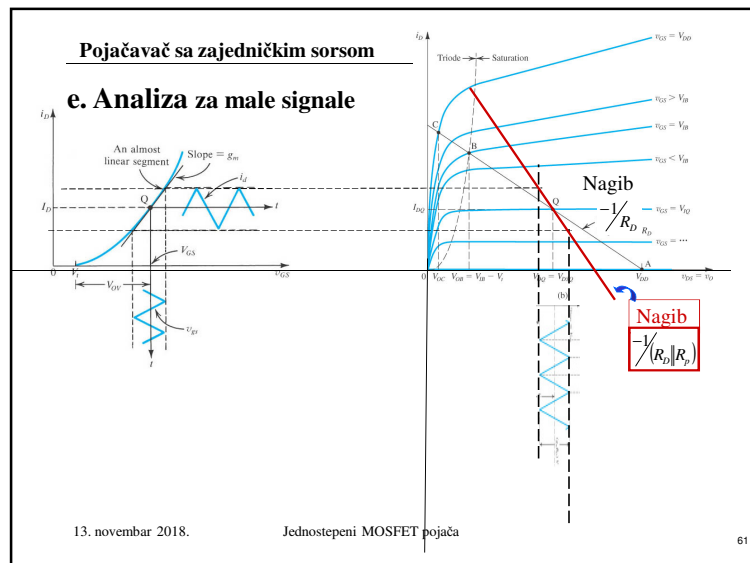
Nagib

Nagib

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 60

Jednostepeni MOSFET pojačavači



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?

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET 65

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale – aktivno opterećenje

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET 66

Pojačavač sa zajedničkim sorsom Informativno

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 67

Pojačavač sa zajedničkim sorsom Informativno

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}

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 68

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

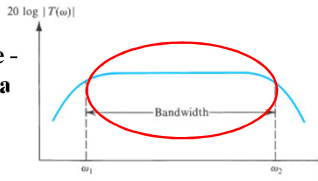
f. Analiza u frekvencijskom domenu

Prethodna analiza:

- Reaktanse svih kondenzatora zanemarene

Rezultat:

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



13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 69

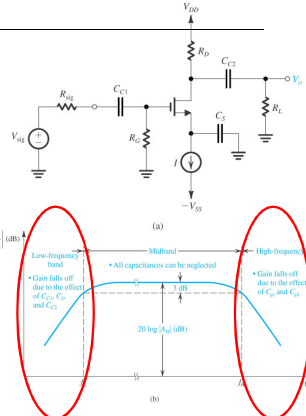
Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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)



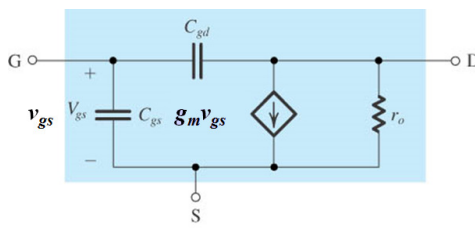
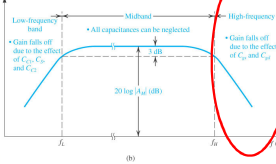
13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 70

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)

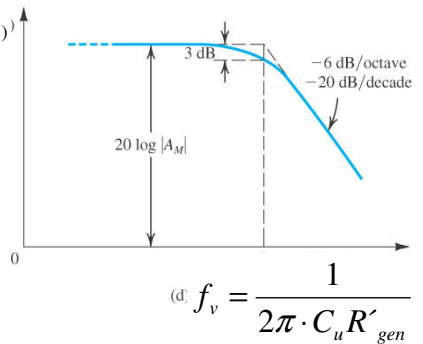
13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 71

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f. Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Gornja granična frekvencija

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

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


Informativno

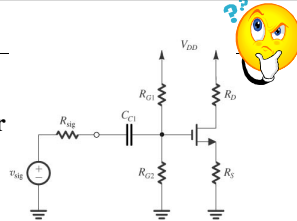
13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 72

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). ($A_v=-10/11$, $R_{in}=3.73M$, $R_o=10k$, $A_v=10$, $R_{in}=1.73M$, $R_o=10k$)

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)

13. novembar 2018.

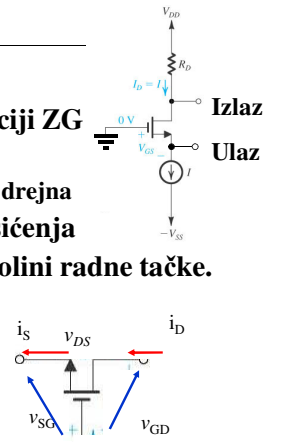
Jednostepeni MOSFET pojačavači

74

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

a. Princip rada:

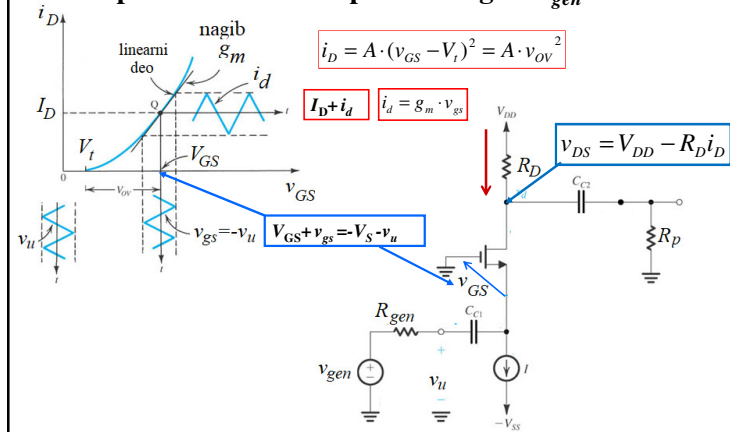
- Tranzistor radi u konfiguraciji ZG
Ulaz $-v_s$ pobuda u kolu sorsa
Izlaz $-i_D$, v_D potrošač u kolu drejna
- Tranzistor radi u oblasti zasićenja
- Pojačava male signale (u okolini radne tačke.
- Ne obrće fazu
- Pojačavač napona



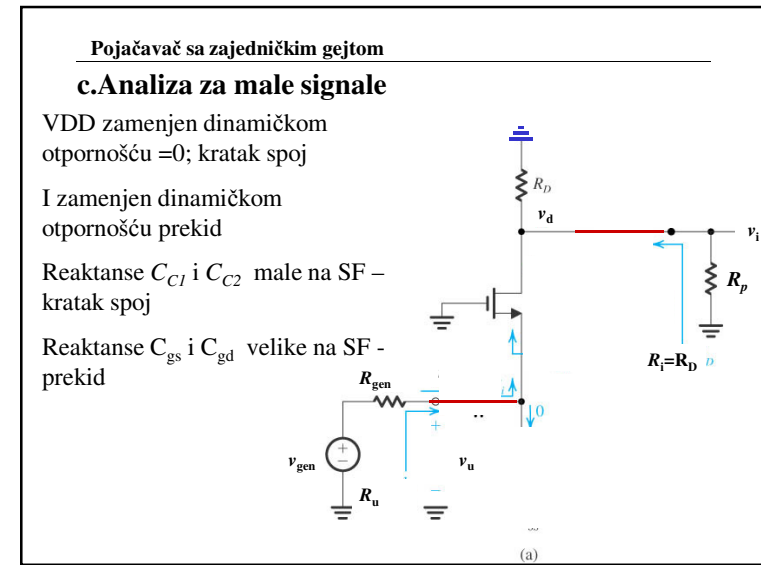
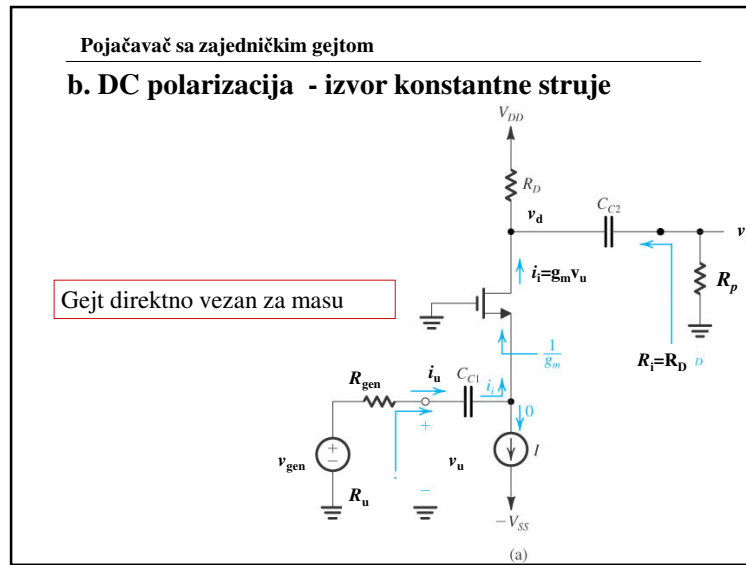
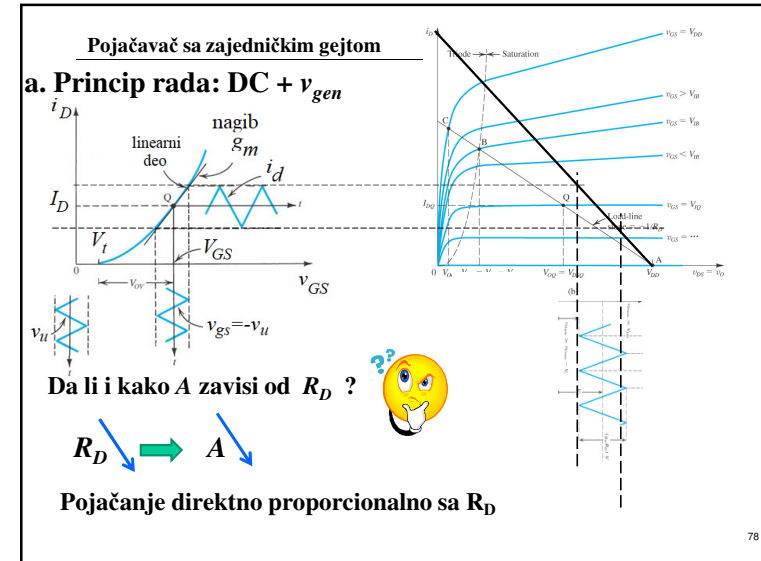
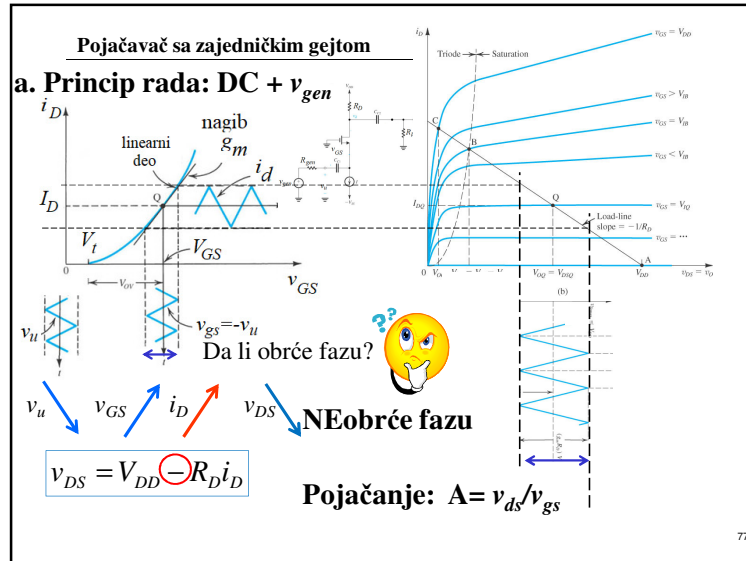
75

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

a. Princip rada: DC + mali pobudni signal v_{gen}



76



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

NE obrće fazu
Proporcionalno sa R_D

$R_u = 1/g_m$
 $R_i = R_D$
 $v_i = -i_d R_D$
 $v_i = -(-g_m v_u) R_D$
 $v_i = g_m R_D v_u$
 $\frac{v_i}{v_u} = A_0 = g_m R_D$

13. novembar 2018. jednostepeni MOSFET pojačavači 81

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

$R_u = 1/g_m$

$R_i = R_D$
 $R_u = 1/g_m$

13. novembar 2018. jednostepeni MOSFET pojačavači 82

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

$R_i = R_D$

$R_u = 1/g_m$
 $R_i = R_D$

13. novembar 2018. jednostepeni MOSFET pojačavači 83

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

$R_u = 1/g_m$
 $R_i = R_D$

$R_u = 1/g_m$
 $R_i = R_D$

13. novembar 2018. jednostepeni MOSFET pojačavači 84

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

e. Analiza za male signale

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

$$A_0 = g_m R_D = 20$$

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

$$A_u = \frac{R_p A_0}{R_p + R_i} \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} = \frac{R_p R_D}{R_p + R_D} g_m \frac{1/g_m}{1/g_m + R_{gen}}$$

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 85

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

Veoma mala ulazna otpornost degradira ukupno naponsko pojačanje kod ZG

13. novembar 2018. 86

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 87

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

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

$$i_u \cong i_{gen}$$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači (c) 88

Informativno

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

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)

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 89

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_v , R_{in} , R_i i A_v ukoliko je $R_p=15k$, $R_g=50\Omega$. ($A_v=15V/V$, $R_{in}=1k$, $R_i=15k$, $A_v=7.5V/V$)

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 90

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (source follower)

- Princip rada
- DC polarizacija
- Stabilnost
- Analiza za male signale
 - Ulazna otpornost
 - Pojačanje
 - Izlazna otpornost
- Analiza u frekvencijskom domenu

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 91

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 92

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

a. Princip rada: DC + mali pobudni signal v_{gen}

$i_D = A \cdot (v_{GS} - V_T)^2 = A \cdot v_{OV}^2$

$i_d = g_m \cdot v_{gs}$

$v_S = R_p i_D$

NEobrće fazu

93

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

b. DC polarizacija - izvor konstantne struje

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači

94

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači

95

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

c. Analiza za male signale SF

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

Pojačavač

Ulaz

Izlaz

13. novembar 2018.

96

Pojačavač sa zajedničkim drejnom
c. Analiza za male signale

$v_g = v_u$
 $v_i = v_s$
 $v_{gs} = v_g - v_s = v_u - v_i$
 $i_d = g_m v_{gs} = g_m (v_u - v_i)$
 $v_i = i_d r_o$
 $v_i = g_m (v_u - v_i) r_o$
 $v_i (1 + g_m r_o) = g_m r_o v_u$
 $\frac{v_i}{v_u} = A_o = \frac{g_m r_o}{1 + g_m r_o}$

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

13. novembar 2018. 97

Pojačavač sa zajedničkim drejnom
c. Analiza za male signale

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

$R_u = R_G$

13. novembar 2018. 98

Pojačavač sa zajedničkim drejnom
c. Analiza za male signale

$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0}$
 $i_i = \frac{v_i}{r_o} - i_d$
 $i_d = g_m v_{gs} = g_m (v_g - v_s)$
 $i_d = g_m (0 - v_i) = -g_m v_i$
 $i_i = \frac{v_i}{r_o} - (-g_m v_i) = v_i \left(\frac{1}{r_o} + g_m \right)$
 $R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u=0} = \frac{r_o}{1 + g_m r_o} \approx \frac{r_o}{g_m r_o} = \frac{1}{g_m}$

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

13. novembar 2018. 99

Pojačavač sa zajedničkim drejnom
c. Analiza za male signale

$R_u = R_G$
 $R_i = 1/g_m$

13. novembar 2018. 100

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

$A_0=1$ $R_u = R_G = 10 \cdot 10^6 \Omega$; $R_i = 1/g_m = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega$;

$$A_u = \frac{R_p A_0}{R_p + R_i} \frac{R_u}{R_u + R_{gen}} = \frac{R_p A_0}{R_p + 1/g_m} \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}$$

$A_u \approx \frac{8 \cdot 1}{108} \approx 0.08$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 101

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$	$\frac{r_o}{r_o + 1/g_m} \ll 1$
R_i	$R_D \gg$	$1/g_m$ (malo $\times 10\Omega - 100\Omega$)
A_u	$ -g_m (R_D \parallel R_p) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} \gg$	$\frac{R_p}{R_p + 1/g_m} \cdot \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} < 1$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 102

Pojačavač sa zajedničkim gejt

Domaći 6.3:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa

$V_t=1.5\text{V}$, $V_A=75\text{V}$,
 $\mu_n C_{ox} 'W/L=2\text{A}=1\text{mA/V}^2$.
 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 $R_G=1\text{M}\Omega$.
 ($A_o=0.993\text{V/V}$, $R_u=4.7\text{M}$, $R_i=0.993\text{k}$, $A_v=0.768\text{V/V}$)

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 103

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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 $i_d = g_m v_{gs}$.

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 104

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

1. Zajednički sors

$R_u = R_G$ (reda M Ω) 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 x10k Ω)
 $A_u \approx -\frac{R_G}{R_G + R_g} g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_p)$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 105

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 106

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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

107

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

2. Zajednički gejt

$R_u = 1/g_m$ (reda x10 - 100 Ω) 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 x10k Ω)
 $A_u \approx g_m \frac{(R_D \parallel R_p)}{1 + g_m R_g}$

13. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 108

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)

13. novembar 2018.

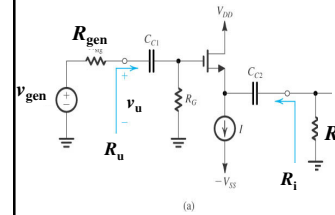
Jednostepeni MOSFET pojačavači

109

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

3. Zajednički drejn



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

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

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

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

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

13. novembar 2018.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

110

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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 ≈ 1
Velika ulazna otpornost;
Mala izlazna otpornost
(naponski bafer)

13. novembar 2018.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

111

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 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

13. novembar 2018.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

slajdovi u pdf formatu

112

Jednostepeni pojačavači sa MOST



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

13. novembar 2018.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

114

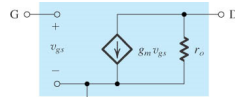
Model MOS tranzistora



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;

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



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

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

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

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

13. novembar 2018.

Modeli poluprovodničkih komponenta

115

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 .)

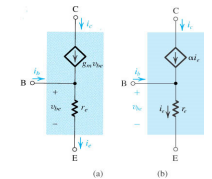
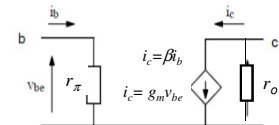
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0,026V} = 38,4mA/V \approx 40mA/V$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{100 \cdot 0,026V}{1mA} = 2,6k\Omega \approx 2,5k\Omega$$

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

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

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



13. novembar 2018.

Modeli poluprovodničkih komponenta

116