

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze: U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (25.11.2017.)	50%	20%
Kolokvijum II (20.01.2018.)	50%	20%
	120%	60%

Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

14. novembar 2017. 1

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

Pojačavač može da se realizuje sa MOS ili BJT tranzistorima

14. novembar 2017. 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

14. novembar 2017. 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 u 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

14. novembar 2017. 4

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

DC
Za pojačavače realizovane na bazi MOST

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

14. novembar 2017. Uvod 5
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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	$V_C > V_B > V_E$	$V_C < V_B < V_E$

14. novembar 2017. Uvod 6
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

DC
kada se utvrde DC struje i naponi, mogu da se izračunaju dinamički parametri ($g_m, r_o, R_o, h_{1D}, h_{2D}, \dots$) aktivnih elemenata

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

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

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

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

14. novembar 2017. Uvod 7
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

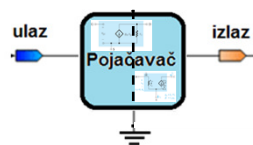
AC
Transformišemo električnu šemu u ekvivalentnu šemu za male signale (kako mali signali „vide“ pojedine komponente.:
a) Poluprovodničke komponente zameniti AC modelima

14. novembar 2017. Uvod 8
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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



14. novembar 2017.

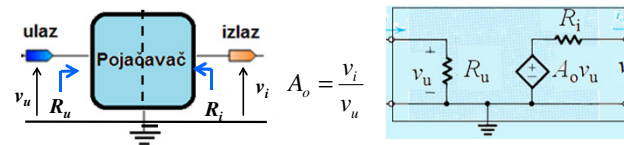
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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
- d) Naći pojačanje A_o , R_u i R_i neopterećenog pojačavača



14. novembar 2017.

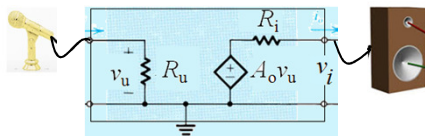
Uvod
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

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
- e) Zameniti model pojačavača u kolu i priključiti AC pobudu i potrošač



14. novembar 2017.

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

11

Osnovni pojačavački stepeni sa MOSFET

12

Osnovne osobine MOS tranzistora

Sadržaj:

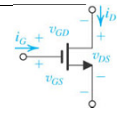
1. Polarizacija MOS tranzistora
2. Pojačavač sa zajedničkim sorsom
3. Pojačavač sa zajedničkim gejtom
4. Pojačavač sa zajedničkim drejnom
5. Kaskodni pojačavači
6. Pojačavač sa CMOS parom

13

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

14

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.

Pojaćanje?

Ulazna otpornost?

Izlazna otpornost?

Ponašanje na niskim frekvencijama, NF

Ponašanje na visokim frekvencijama, VF

15

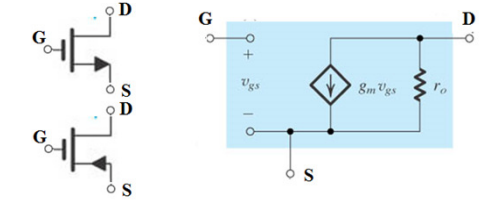
Sadržaj

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



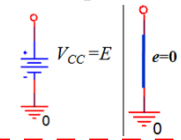
16

Sadržaj

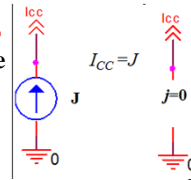
Važi za SVE konfiguracije:
 Postupak AC analize (za male signale.):

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

b) Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona



c) Uklonimo DC izvore konstantne struje



14. novembar 2017. 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

Sadržaj

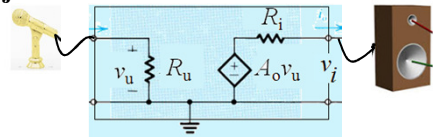
Važi za SVE konfiguracije:
 Postupak AC analize (za male signale.):

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?

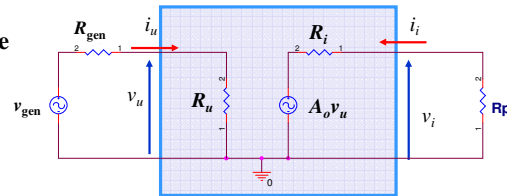
C) Pojačavač u kolu zamenimo modelom



14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT

Analiza za male signam

Odredimo ukupno pojačanje



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

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

Jednostepeni pojačavači sa MOST

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

14. novembar 2017.

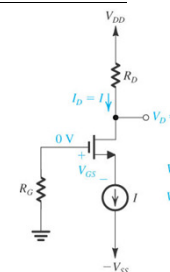
Jednostepeni MOSFET pojačavači

21

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

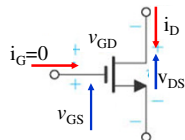


22

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



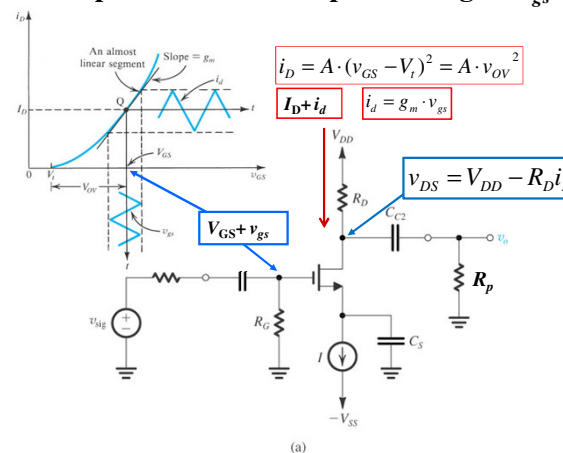
14. novembar 2017.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

23

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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



24

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada: DC + v_{gs}

Da li obrće fazu? 🤔

Obrće fazu

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

Pojačanje: $A = v_{ds}/v_{gs}$

25

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

a. Princip rada: DC + v_{gs}

Da li i kako A zavisi od R_D ? 🤔

$R_D \rightarrow A$

Pojačanje direktno proporcionalno sa R_D

26

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.1 DC polarizacija sa R_G

$I_{G1} = I_{G2}$
Veoma malo

$I_G = 0$

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

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

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

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

Obezbediti rad u oblasti zasićenja:
 $V_{GS} > V_t$; $V_{DS} > V_{GS} - V_t$

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 27

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}

28

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.2 DC polarizacija - otpornik G-D

$V_{GS} = V_{DS}$, Zašto? 🤔

Šta to znači?

Tranzistor uvek u zasićenju,

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

29

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

b.3 DC polarizacija - izvor konstantne struje

$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 = I$

$V_G = ?$

$V_G = 0$

$V_S = ?$

$V_S < -V_t$

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

$I_{REF} = I_{D1} = \frac{1}{2} k_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS} - V_t)^2$

$I = I_{D2} = \frac{1}{2} k_n \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{GS} - V_t)^2$

$I = I_{REF} \left(\frac{W/L_2}{W/L_1}\right)^2$

(a) (b)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 30

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 .

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

14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT 31

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

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

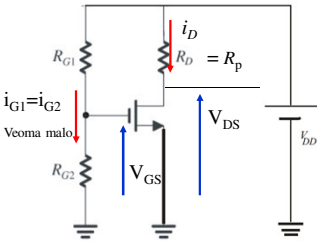
$P_{T \max} = (V_{DD} - R_D I_{DM}) I_{DM} = V_{DSM} I_{DM}$

14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT 32

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

c. Odnosi snaga **Najjednostavniji slučaj**

Stepen iskorišćenja u odsutstvu signala



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

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

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

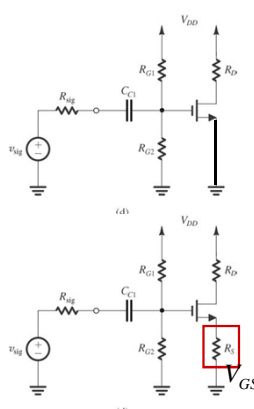
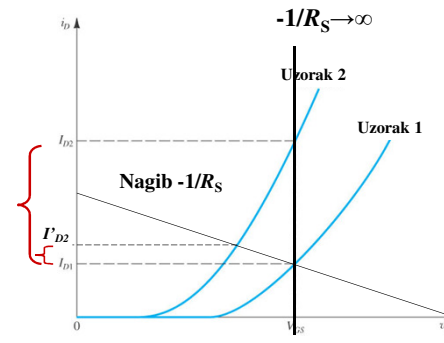
za $V_{DM} = V_{DD}/2$

$$\eta = 50\%$$

14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT 33

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

d. Stabilnost

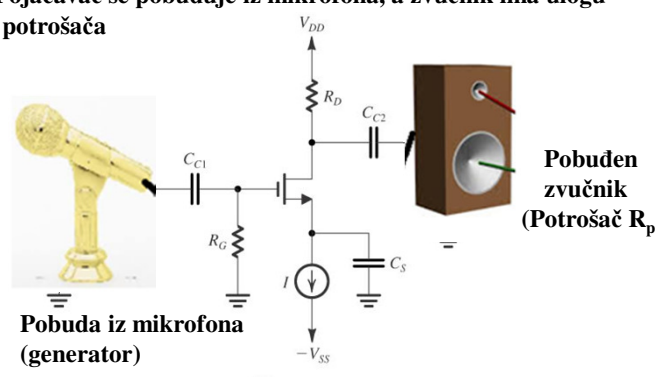
Stabilnost: zavisnost I_D od uzorka tranzistora

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 34

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale:

Pojačavač se pobuđuje iz mikrofona, a zvučnik ima ulogu potrošača



Pobuda iz mikrofona (generator)

Pobuden zvučnik (Potrošač R_P)

(a)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 35

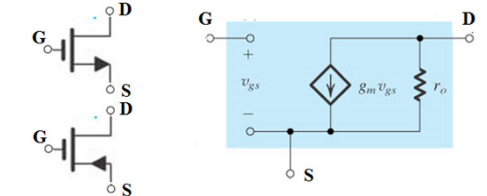
Sadržaj

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



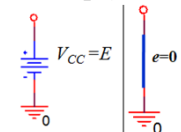
14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT 36

Sadržaj

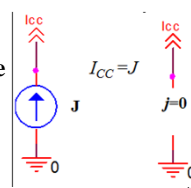
Važi za SVE konfiguracije:
 Postupak AC analize (za male signale):

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

b) **Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona**



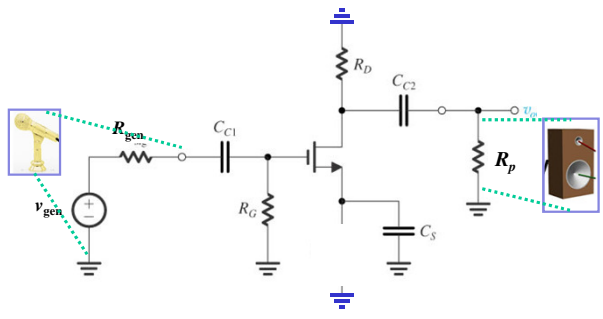
c) **Uklonimo DC izvore konstantne struje**



14. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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



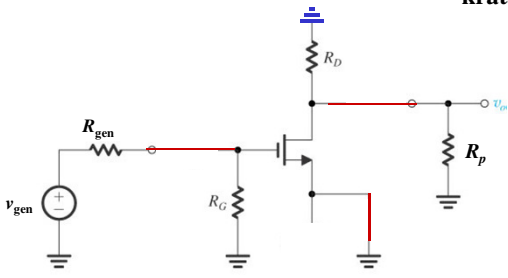
(a)
 Jednostepeni MOSFET pojačavači

14. novembar 2017. 38

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

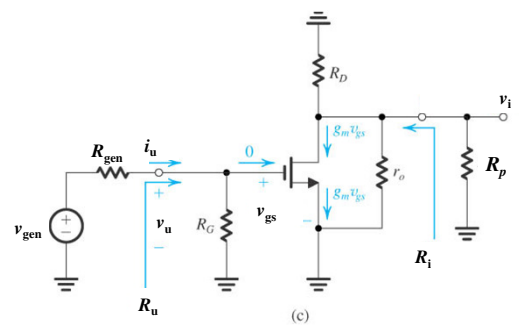


(a)
 Jednostepeni MOSFET pojačavači

14. novembar 2017. 39

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. **Analiza za male signale**



(c)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

40

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 41

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

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

(b)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 42

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale:

spoljašnji elementi

(b)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 43

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 44

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $A_o = ?$

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

Pojačanje direktno proporcionalno sa R_D

14. novembar 2017. 45

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$

(b)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 46

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $A_o = -g_m R_D$

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

Jednostepeni MOSFET pojačavači

14. novembar 2017. 47

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

$R_u = R_G$ $A_o = -g_m R_D$

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 48

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 49

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

$$A_0 = -g_m R_D = -20$$

$$A_u = -\frac{R_p}{R_p + R_D} (A_0) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}} = -\frac{R_p}{R_p + R_D} (g_m R_D) \frac{R_G}{R_G + R_{gen}}$$

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 50

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

Dinamička radna prava

Nagib

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 51

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

Nagib

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačači 52

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

An almost linear segment
Slope = g_m

Za slučaj da je $R_z=R_p=8\Omega$

Nagib $-1/R_D$

Nagib $-1/R_z$

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojača

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?

??

Idealna statička

Nagib $-1/R_p$

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale – aktivno opterećenje

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

Idealna statička

Nagib $-1/R_p$

DC

AC

Jednostepeni MOSFET

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET

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

Triodna

Nagib = $1/r_o$

Zasićenje

I_{REF}

$V_{DS2}=V_{GS2}$

$V_{GS2} - |V_t|$

$V_{DS2}=V_{D2}-V_{DD}$

(a)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

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}

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 57

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 58

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)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 59

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f. Analiza u frekvencijskom domenu

Na VF: C_{gd} i C_{gs} dolaze do izražaja $\left| \frac{v_D}{v_g} \right| [dB]$

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 60

Informativno

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

f. Analiza u frekvencijskom domenu

VF – Gornja granična frekvencija

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 61

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

Domaći 5.1:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$, $\lambda=0$.
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). ($A_v=-10/11$, $R_{in}=3.73M$, $R_{ic}=10k$, $A_v=10$, $R_{oc}=1.73M$, $R_{ic}=10k$)

64

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)

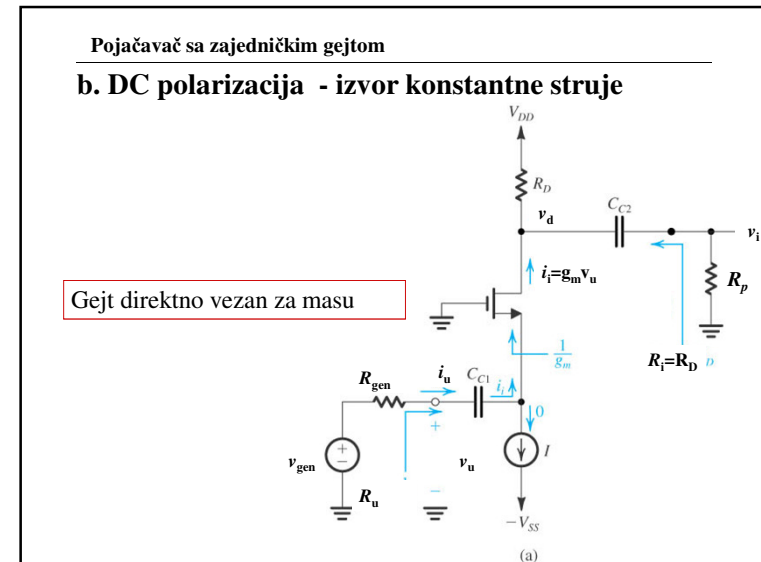
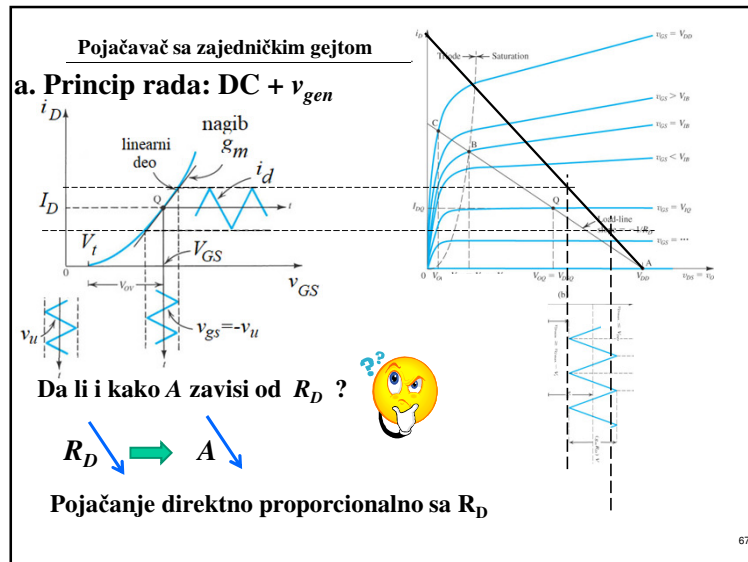
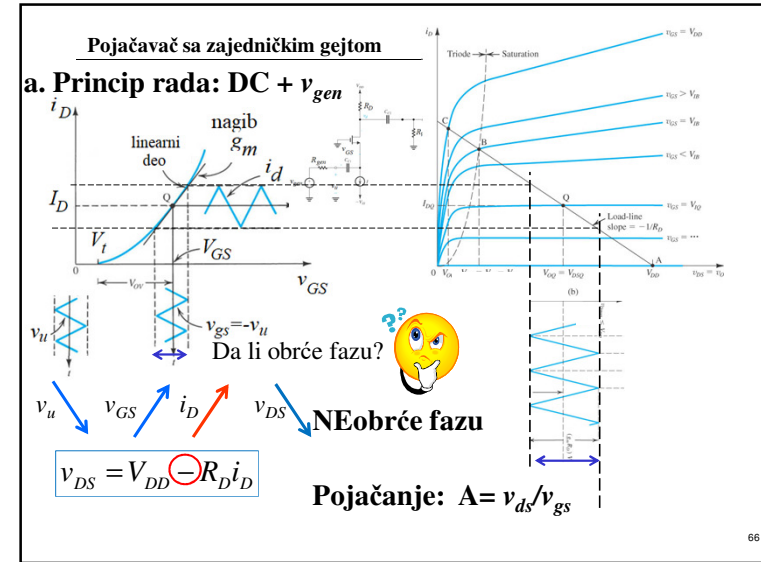
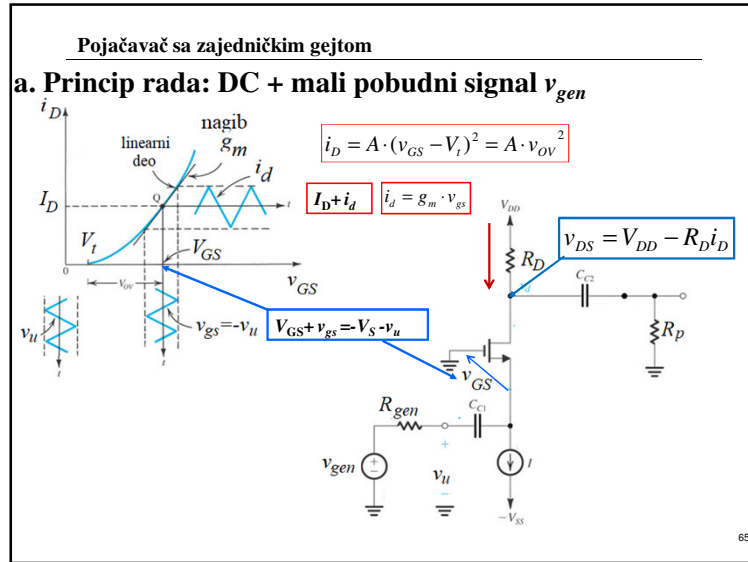
14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 63

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

64



Pojačavač sa zajedničkim gejtom

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

(a)

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

14. novembar 2017. jednostepeni MOSFET pojačavači 70

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

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

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

14. novembar 2017. jednostepeni MOSFET pojačavači 71

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

$R_i = R_D$

$R_i = R_D$

14. novembar 2017. jednostepeni MOSFET pojačavači 72

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

$R_u = 1/g_m$

$R_o = R_D$

$A_o = g_m R_D$

$i = g_m v_u$

$R_i = R_D$

Pojačavač

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 73

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

e. Analiza za male signale

$R_u = 1/g_m$

$R_o = R_D$

$A_o = g_m R_D$

$R_i = R_D$

Pojačavač

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

$A_o = g_m R_D = 20$

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 74

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

$R_u = 1/g_m$

$R_i = R_D$

Pojačavač

Veoma mala ulazna otpornost degradira ukupno naponsko pojačanje kod ZG

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 75

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 76

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

c. Analiza za male signale

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

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

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

$$i_u \cong i_{gen}$$

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači (c) 77

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)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 78

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

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

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 79

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

3. Pojačavač sa zajedničkim drejnom (source follower)

a. Princip rada

b. DC polarizacija

Stabilnost

c. Analiza za male signale

c. Ulazna otpornost

d. Pojačanje

e. Izlazna otpornost

d. Analiza u frekvencijskom domenu

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 80

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

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**

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 81

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 82

Pojačavač sa zajedničkim drevnom

b. DC polarizacija - izvor konstantne struje

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 83

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 84

Jednostepeni MOSFET pojačavači

Pojačavač sa zajedničkim dregnjom

c. Analiza za male signale

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

Ulaz

Izlaz

14. novembar 2017.

Pojačavač sa zajedničkim dregnjom

c. Analiza za male signale

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

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

Ulaz

Izlaz

14. novembar 2017.

Pojačavač sa zajedničkim dregnjom

c. Analiza za male signale

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

$R_u = R_G$

Ulaz

Izlaz

14. novembar 2017.

Pojačavač sa zajedničkim dregnjom

c. Analiza za male signale

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

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

Ulaz

Izlaz

14. novembar 2017.

Pojačavač sa zajedničkim drejnom

c. Analiza za male signale

Ulaz

Izlaz

14. novembar 2017.

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

e. Analiza za male signale

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

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

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

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

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

91

Pojačavač sa zajedničkim gejtu

Domaći 5.3:

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)

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_u ukoliko je $R_G=1\text{M}\Omega$.
 ($A_o=0.993\text{V/V}$, $R_u=4.7\text{M}$, $R_i=0.993\text{k}$, $A_u=0.768\text{V/V}$)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

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 $i_d = g_m v_{gs}$.

14. novembar 2017.

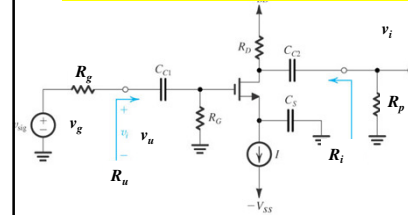
Jednostepeni MOSFET pojačavači

93

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

1. Zajednički sors



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

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

$$A_0 \approx -g_m R_D$$

(reda $\times 10 - \times 100 \text{ V/V}$)

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

$$R_i = r_o \parallel R_D \approx R_D \text{ (reda } \times 10 \text{ k}\Omega \text{)}$$

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

14. novembar 2017.

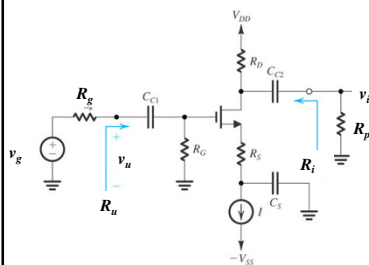
Jednostepeni MOSFET pojačavači

94

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

14. novembar 2017.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

95

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

96

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

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 97

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)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 98

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

3. Zajednički drejnj

$R_u = R_G$ (reda MΩ) veliko
 $A_o = \frac{r_o}{r_o + 1/g_m} \ll 1$
 $A = \frac{r_o \parallel R_p}{r_o \parallel R_p + 1/g_m} < 1$
 $R_i \approx \frac{1}{g_m}$ (reda x10-100Ω) malo!!!
 $A_u \approx \frac{R_G}{R_G + R_g} \frac{r_o \parallel R_p}{r_o \parallel R_p + 1/g_m} < 1$

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 99

Jednostepeni pojačavači sa MOST

Rezime:

- **Konfiguracija sa zajedničkim drejnjom:**
 - 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)

14. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 100

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

14. novembar 2017.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

slajdovi u pdf formatu

101

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

14. novembar 2017.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

103

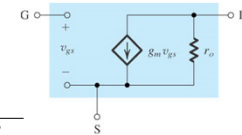
Model MOS tranzistora



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) $V_{DS} > V_{GS} + V_T = V_{GS} + 1V$;



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

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} - V_T = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 75 \cdot 10^{-6}}{120 \cdot 10^{-6} \cdot 10}} = 0.35V$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{0.35} = 424 \mu A/V < g_{mBJT} = 40mA/V \text{ e)}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0.02 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 666,66k\Omega \approx 0.67M\Omega$$

14. novembar 2017. Modeli poluprovodničkih komponenta

104

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 .)

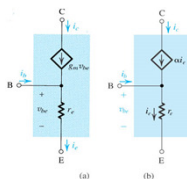
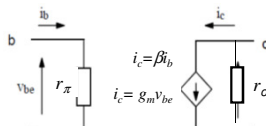
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0.026V} = 38,4mA/V \approx 40mA/V$$

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

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

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

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



14. novembar 2017.

Modeli poluprovodničkih
komponenata

105