

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (02.12.2019.)	50%	20%
Kolokvijum II (13.01.2020.)	50%	20%



120% 60%

Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

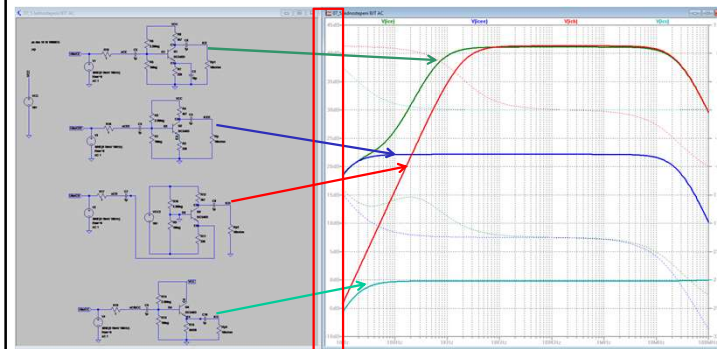
Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

27. novembar 2019.

1

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo: $R_{gen}=1\Omega$, $R_p=10k\Omega$



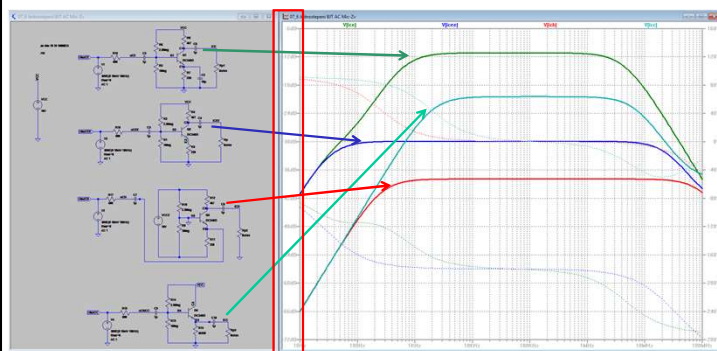
27. novembar 2019.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

2

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo: $R_{gen}=600\Omega$, $R_p=8\Omega$

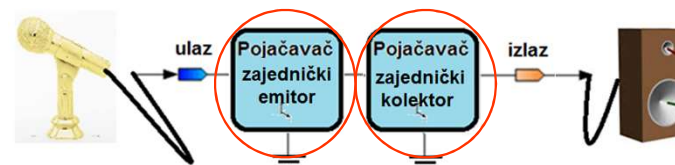


27. novembar 2019.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

3

Da se podsetimo

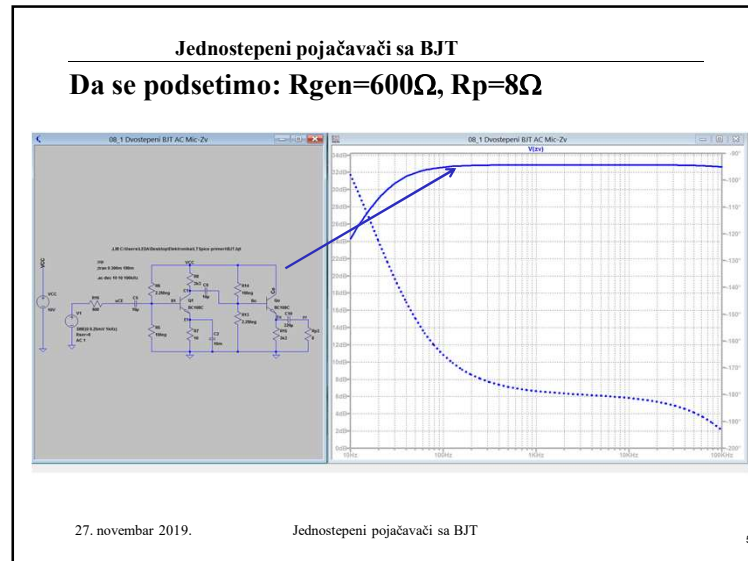


1. Zašto?
2. Šta će se desiti kada ih vežemo?

27. novembar 2019.

Višestepeni pojačavači

4



Diferencijalni pojačavači

7

Sadržaj

- 1. Zašto?**
- 2. Princip rada**
- 3. Osobine**
- 4. Realizacija sa MOS**
- 5. Realizacija sa BJT**

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 8

Zašto diferencijalni ?

Naziv „diferencijalni“ šta znači? 🤔

Pojačavaju razliku signala.

Zašto razliku, a ne zbir? - diferencijalni 🤔

- poništavanje smetnji

Uz to:

- mala temperaturska osetljivost, mali temperaturski drift
- relativno veliko pojačanje
- laka realizacija u IC

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 9

Zašto diferencijalni ?

Poništavanje smetnji:

A 2V 1V 1V
B 2V 1V 1V
A-B 1V -1V

A 2V 1V 1V
B 2V 1V 1V
A-B 1V -1V

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 10

Osobine

Želja:

- Što veće pojačanje razlike ulaznih signala.
 - Što manje pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala.
- Što veća ulazna otpornost.
- Što manja izlazna otpornost.

Kako ispuniti ovu želju? 🤔

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 11

Osobine

Pretpostavke: 🤔

Ako se pojačava razlika signala, mora da postoje dva ulaza

Raspolažemo sa jednostepenim pojačavačima – moguće je sklopiti dva pojačavača u jedan.

Jedan da obrće a drugi da ne obrće fazu!? 🤔

ZG i ZS? Imaju isto naponsko pojačanje? 🤔

Šta je sa ulaznim otponostima?

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 12

Osobine

Realizacija: 🤔

Nije dobro ZS i ZG zbog ulazne otpornosti

Da budu oba ZS? 🤔

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza. 🤔

Šta bi se time dobilo? 🤔

Solidno pojačanje razlike ulaznih signala napona.

Relativno velika ulazna, koja može da se poveća sa R_S ali i izlazna otpornost.

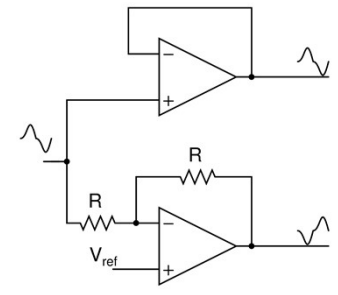
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 13

Kako diferencijalni signal ?

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza. 🤔

Kako napraviti diferencijalni signal?

Kombinovanjem invertorskog i neinvertorskog pojačavača



27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 14

Realizacija diferencijalnog pojačavača

Dva sa ZS (ZE). 🤔

Biramo najbolje rešenje: 🤔

Zbog stabilnosti – otpornost u sorsu (emitoru).

Zbog pojačanja što veća dinamička otpornost u drejnu/kolektoru.

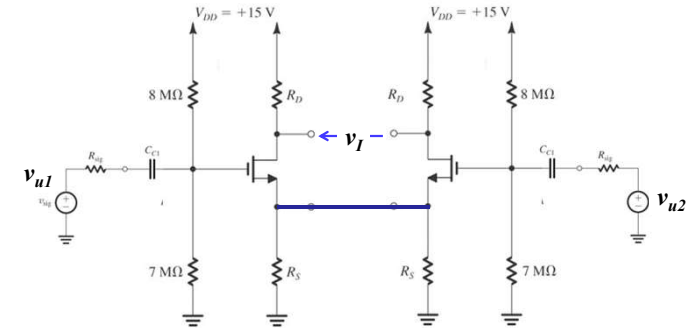
Zbog ulazne otpornosti što veća dinamička otpornost u sorsu/emitoru.

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 15

Princip rada

Realizacija: Dva ZE (ZS) stepena sa E (S) vezanim za isti čvor pobuđena invertovanim signalima $v_{u1} = -v_{u2} = v_u/2$

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI



27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 16

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI

Princip rada

Realizacija: Dva ZE (ZS) stepena sa E (S) vezanim za isti čvor pobuđena invertovanim signalima

$v_{u1} = -v_{u2} = v_u/2$

$v_i = v_{C1} - v_{C2}$ **Simetričan izlaz**

$v_i = v_{D1} - v_{D2}$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 17

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI

Osobine

Osobine diferencijalnih pojačavača:

- Solidno pojačanje razlike ulaznih signala (kao ZS/ZE).**
- Malo pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala (veliko potiskivanje srednje vrednosti).**
- Veća ulazna otpornost nego ZS/ZE.**
- Veća izlazna otpornost nego ZS/ZE.**

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 18

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI

Princip rada

Moguće kombinacije:

Asimetrični ulaz

Asimetrični izlaz

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 19

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:

Dva simetrična ulaza
Dva simetrična izlaza
Ulazni signali:

Korisni: signal razlike (diferencijalni)

$$v_{UD} = v_{G1} - v_{G2} = V_G + v_{g1} - (V_G + v_{g2})$$

$$v_{UD} = v_{ud} = v_{g1} - v_{g2} \quad \text{Za identične tranzistore}$$

Korisni: signal razlike na izlazu (diferencijalni)

$$v_{ID} = v_{D1} - v_{D2} = V_{D1} - R_D(g_m v_{g1}) - (V_{D2} - R_D(g_m v_{g2}))$$

$$V_{D1} = (V_{DD} - R_D \frac{I}{2}) = V_{D2} \quad \text{Za identične tranzistore}$$

$$v_{ID} = -R_D g_m (v_{g1} - v_{g2}) = -R_D g_m v_{UD}$$

20

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:

Neželjeni: zajednički napon na oba ulaza - signal srednje vrednosti

$$v_{US} = (v_{G1} + v_{G2})/2 = (V_G + v_{g1} + (V_G + v_{g2}))/2$$

$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} \equiv v_{UCM} \equiv v_{UC}$$

Za $v_{g1} = -v_{g2}$ je $v_{d1} = -v_{d2}$

$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} = V_{US} \equiv v_{UCM} \equiv v_{UC} = V_G$$

27. novembar 2019. 21

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2

Za identične tranzistore i $R_{D1} = R_{D2}$

$$V_{D1} = V_{D2} = V_D$$

$$v_{ID} = v_{D1} - v_{D2} = V_{D1} + v_{d1} - (V_{D2} + v_{d2})$$

$$v_{ID} = (V_{D1} - V_{D2}) + (v_{d1} - v_{d2}) = v_{d1} - v_{d2} = v_{id}$$

$$v_{IS} = (v_{D1} + v_{D2})/2 = (V_{D1} + v_{d1} + (V_{D2} + v_{d2}))/2$$

$$v_{IS} = V_D + \frac{(v_{d1} + v_{d2})}{2} \equiv v_{ICM} \equiv v_{IC}$$

Za $v_{g1} = -v_{g2}$, $R_{D1} = R_{D2}$ i identične tranzistore je $v_{d1} = -v_{d2}$

$$v_{ICM} = V_{ICM} = V_D$$

27. novembar 2019. 22

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2, diferencijalni izlaz

$$A_d = \frac{v_{id}}{v_{ud}} = \frac{v_{d1} - v_{d2}}{v_{g1} - v_{g2}}$$

$$A_c = \frac{v_{id}}{v_{uc}} = \frac{v_{d1} - v_{d2}}{V_{CM}} \rightarrow 0$$

Faktor potiskivanja srednje vrednosti

$$\rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

CMRR (Common Mode Rejection Ratio):

Pokazuje koliko puta je pojačanje razlike veće od pojačanja srednje vrednosti

27. novembar 2019. 23

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

Za $R_{D1} = R_{D2} = R_D$ i identične tranzistore:

$$A_d = -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \approx -g_m R_D$$

$$\left(\begin{array}{l} g_m \equiv S \\ r_o \equiv R_i \\ g_m r_o \equiv \mu \end{array} \right)$$

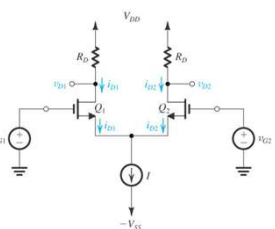
$$A_d = -\frac{\mu R_D}{R_i + R_D} \approx -SR_D, \text{ za } R_i \gg R_D$$

diferencijalno pojačanje jednako pojačanju ZS (razmisliti o nivoima napona na svakom ulazu, svakom izlazu, diferencijalnom UL i dif. IZ naponu)

Videti šestu nedelju predavanja „Jednostepeni MOSFET pojačavači“.

27. novembar 2019. 24

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST



Za $R_{D1}=R_{D2}=R_D$ i identične tranzistore:

CMRR veće za veće R_S

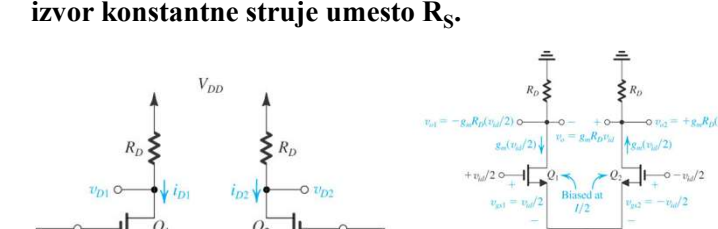
Zato - ŠTA? 🤔

izvor konstantne struje umesto R_S .

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 25

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_S .



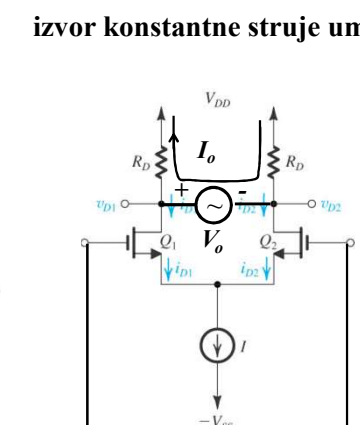
Za simetrični izlaz

$A_c=0.$
 $A_d=-g_m R_D.$
 $\rho \rightarrow \infty$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 6

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_S .



Izlazna otpornost

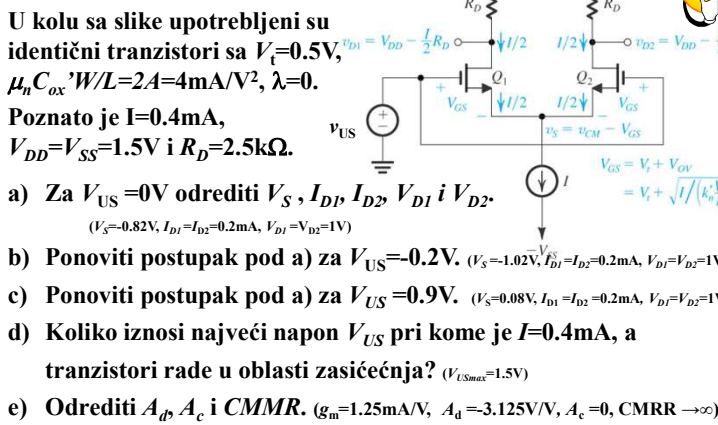
$$R_i = \frac{V_o}{I_o} = R_{D1} + R_{D2} = 2R_D$$

Dva puta veća nego kod pojačavača sa Z_S !!!

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 27

PREDUSLOV: IDENTIČNI TRANZISTORI
Realizacija sa MOST

Domaći 8.1: U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa $V_t=0.5V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$, $\lambda=0$.
Poznato je $I=0.4mA$, $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$ i $R_D=2.5k\Omega$.



- Za $V_{US}=0V$ odrediti V_S , I_{D1} , I_{D2} , V_{D1} i V_{D2} .
($V_S=-0.82V$, $I_{D1}=I_{D2}=0.2mA$, $V_{D1}=V_{D2}=1V$)
- Ponoviti postupak pod a) za $V_{US}=-0.2V$. ($V_S=-1.02V$, $I_{D1}=I_{D2}=0.2mA$, $V_{D1}=V_{D2}=1V$)
- Ponoviti postupak pod a) za $V_{US}=0.9V$. ($V_S=0.08V$, $I_{D1}=I_{D2}=0.2mA$, $V_{D1}=V_{D2}=1V$)
- Koliko iznosi najveći napon V_{US} pri kome je $I=0.4mA$, a tranzistori rade u oblasti zasićenja? ($V_{USmax}=1.5V$)
- Odrediti A_d , A_c i $CMRR$. ($g_m=1.25mA/V$, $A_d=-3.125V/V$, $A_c=0$, $CMRR \rightarrow \infty$)

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači E7.1 28

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Primer BJT pojačavač:

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 29

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Za potpuno simetrično kolo sa velikim RE (izvor konstantne struje).

Za $h_{12E}=0$ i $h_{22E}=0$.

Smatra se da su $R_{g1}=R_{g2}=0$.

$A_{cd} = A_{dc} = 0$

$$A_d = -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} R_C = -g_m R_C$$

$$A_c = -\frac{h_{21E} R_C}{2R_E h_{11E} (1 + h_{21E} + \frac{h_{11E}}{2R_E})} \approx -\frac{R_C}{2R_E} \text{ Pojačanje sa ZE}$$

pojačanje srednje vrednosti jednako pojačanju ZE sa otpornikom $2R_0$ u emitoru (degeneracija u emitoru).

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 30

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

$$\rho = \frac{2R_E}{h_{11E}} (1 + h_{21E} + \frac{h_{11E}}{2R_E})$$

$$\rho = 1 + \frac{2R_E}{h_{11E}} (1 + h_{21E}) \approx 2g_m R_E$$

Za tipične vrednosti h -parametara kao što su $h_{11E}=2 \text{ k}\Omega$, $h_{21E}=150$ i $h_{22E}=1/R_0=25 \mu\text{A/V}$, dobija se $\rho = 6000$.

Faktor potiskivanja ne zavisi od R_C nego od R_E .
Manja I_c ili bolji strujni izvor (Wilsonov) \rightarrow veće R_E .

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 31

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Wilsonov strujni izvor - veće R_E .

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 32

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Realizacija sa BJT Za one koji žele da nauče više

Ulazna otpornost

$$R_u = \frac{V}{I} = 2h_{11E}$$

2x veća nego kod ZE

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 33

Realizacija sa BJT Za one koji žele da nauče više

Izlazna otpornost

$$R_i = \frac{V}{I} = R_{C1} + R_{C2}$$

**Za $R_{C1}=R_{C2}$
2x veća nego kod ZE**

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 34

Za one koji žele da nauče više

Realizacija sa MOF

Domaći 8.2 :

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $\alpha=1$, $V_{BE}=0.7V$.
 Poznato je $I=1mA$, $V_{CC}=15V$ i $R_C=10k\Omega$, $v_{BE1}=5+0.005\sin(\omega t)V$
 $v_{BE2}=5-0.005\sin(\omega t)V$.

Odrediti

- i_{C1} , i_{C2} , ($i_{C1}=0.5+0.1\sin(\omega t)$ mA, $i_{C2}=0.5-0.1\sin(\omega t)$ mA)
- v_{C1} , v_{C2} . ($v_{C1}=10-1\sin(\omega t)$ V, $v_{C2}=10+1\sin(\omega t)$ V)
- Ad. ($A_d=200V/V$)

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 35

Za one koji žele da nauče više

Realizacija sa BJT

MOS v.s. BJT

$$R_{uMOS} > R_{uBJT}$$

$$g_{mMOS} < g_{mBJT}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 36

Direktna sprega

Poboljšanje karakteristika: Darlingtonova sprega
 Direktnom spregom može da se se postigne veće β i veća ulazna otpornost tranzistora

$\beta_e = \beta_1 \beta_2$

“Kvazi” PNP

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 37

Diferencijalni pojačavači

Prenosne karakteristike
 zavisnost trenutne vrednosti izlazne veličine od trenutne vrednosti ulazne veličine.

Statička –
 za spore signale – bez reaktivnih elemenata

Dinamička –
 za VF – sa reaktivnim elementima

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 38

Statička prenosna karakteristika sa MOST

Počnimo analizu uz pretpostavku da je T1 zakočen a da T2 vodi

$V_{GS1} < V_t$ i počinje da raste:
 V_{G1} malo, T1 zakočen, $I_{D1}=0$ $V_{DS1max}=V_{DD}$.
 Za $V_{G2} > V_t$, T2 vodi (u zasićenju), $I_{D2}=I_o$,
 $V_{DS2min} = V_{DD} - I_o R_D$

V_{G1} raste, T1 provede:
 $I_{D1} + I_{D2} = I_o = Const.$
 $I_{D1} \uparrow, I_{D2} \downarrow, V_{DS1} \downarrow, V_{DS2} \uparrow$

$I_{D1max} = I_o$ za
 $V_{GS1} - V_t = (I_o/A)^{1/2}$
 $V_{DS1min} = V_{DD} - I_o R_D$
 $V_{DS2max} = V_{DD}$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 39

Statička prenosna karakteristika MOST

Raspon (dinamika) izlaznog signala

$$V_{izmax} = (V_{DS2max} - V_{DS1min}) = V_{DD} - (V_{DD} - I_o R_D)$$

$$V_{izmax} = I_o R_D$$

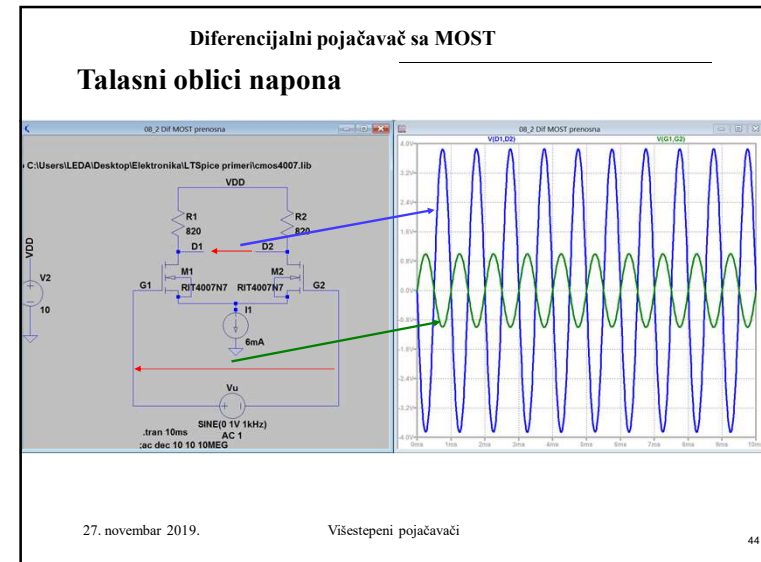
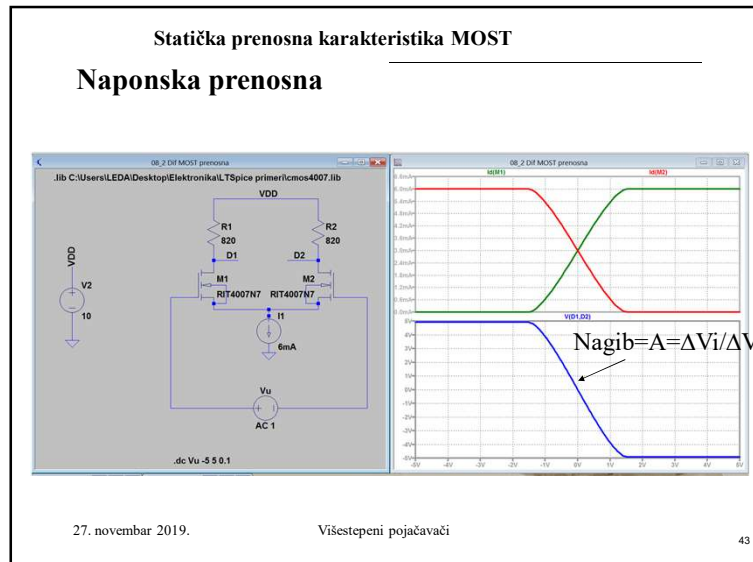
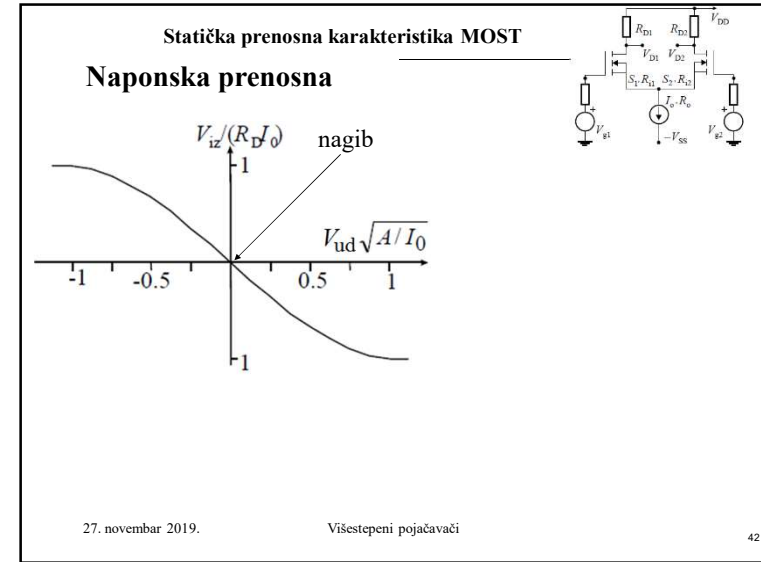
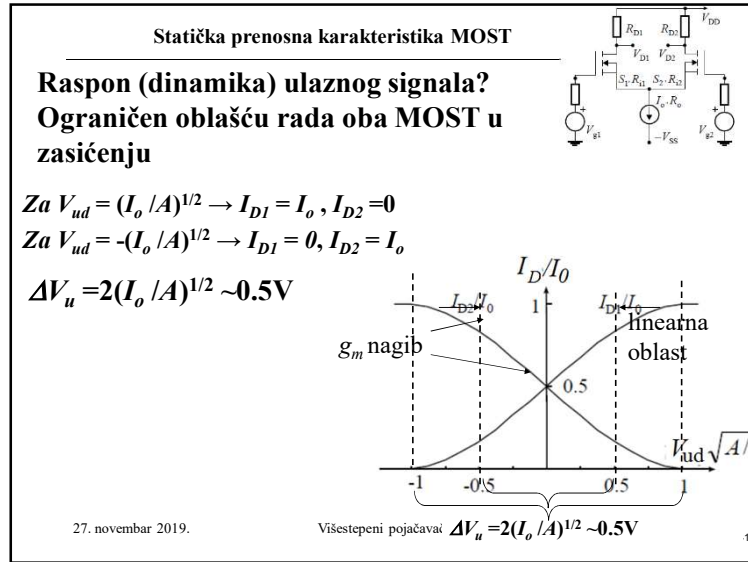
$$V_{izmin} = (V_{DS2min} - V_{DS1max}) = (V_{DD} - I_o R_D) - V_{DD}$$

$$V_{izmin} = -I_o R_D$$

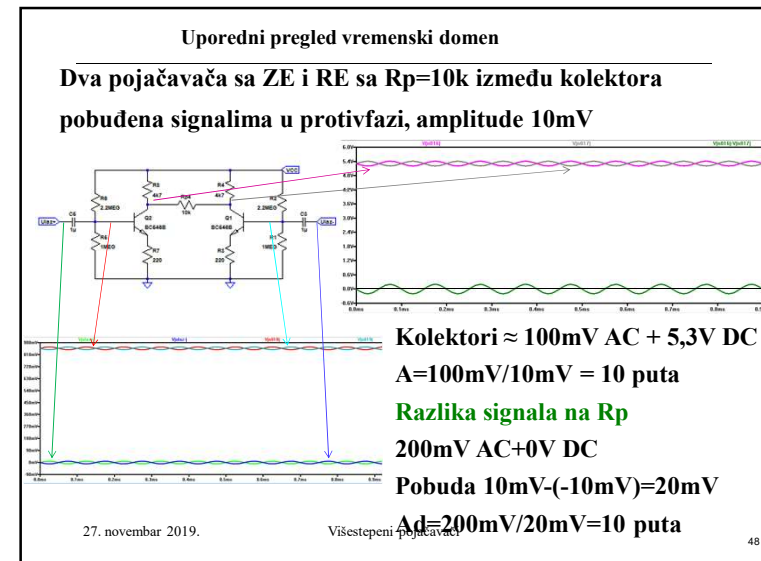
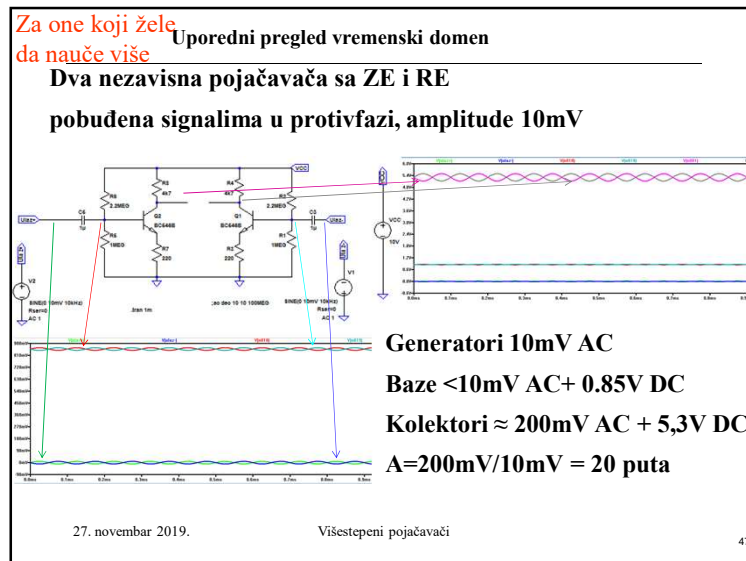
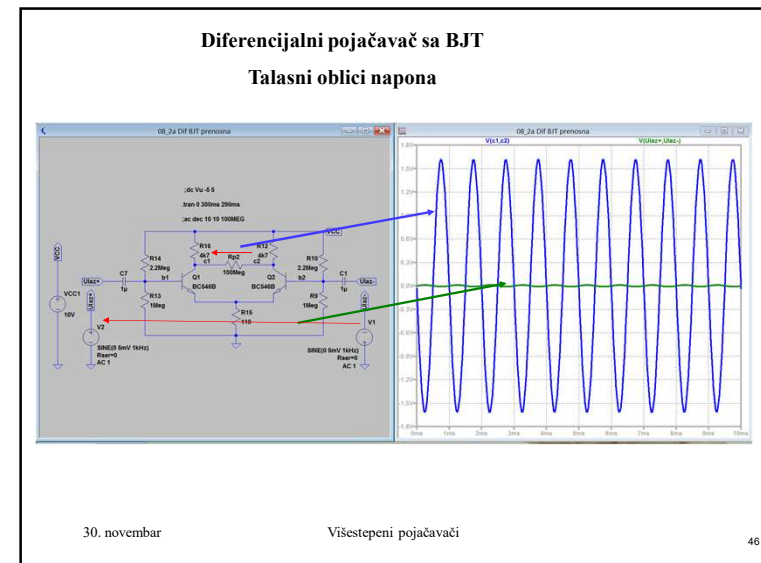
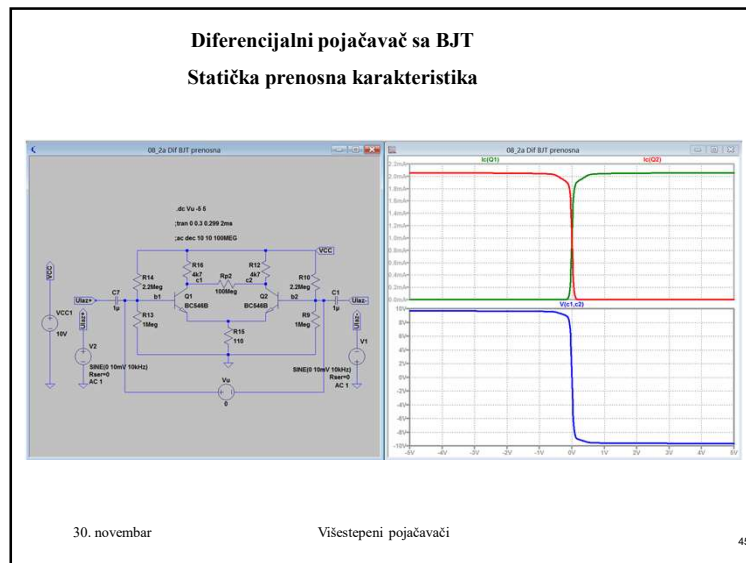
$$\Delta V_{iz} = (V_{izmax}) - (V_{izmin}) = 2R_D I_o$$

Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa R_D i I_o .

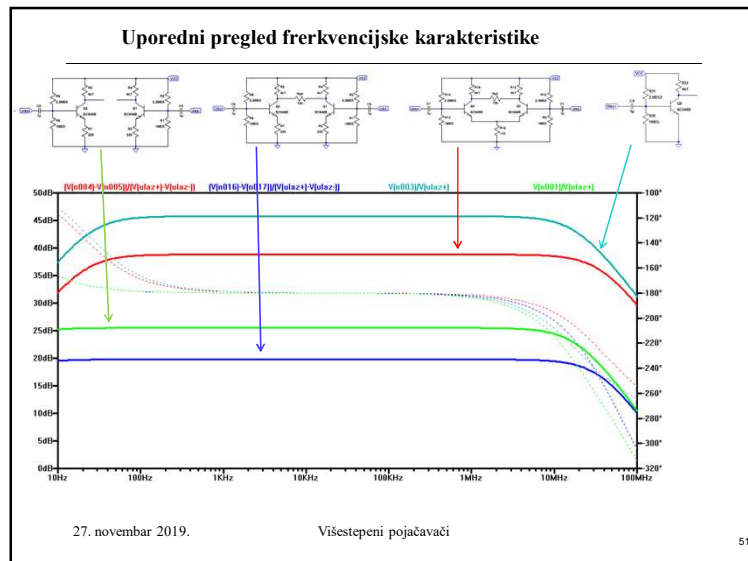
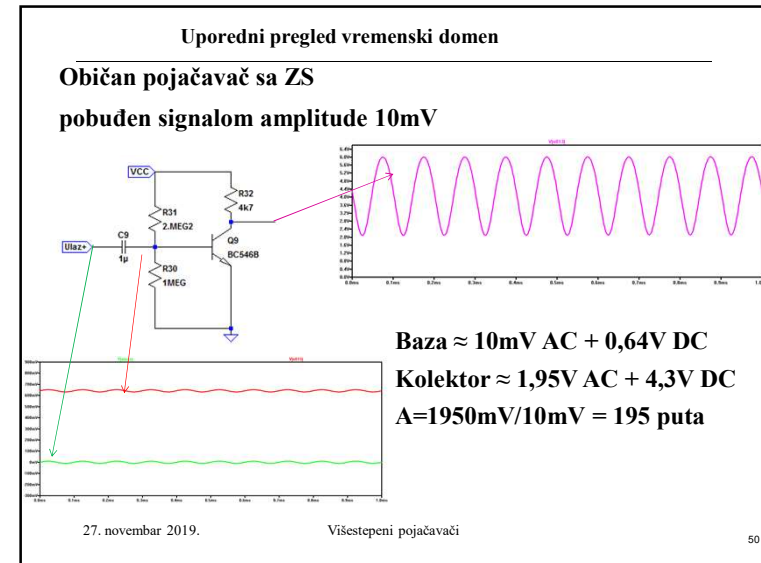
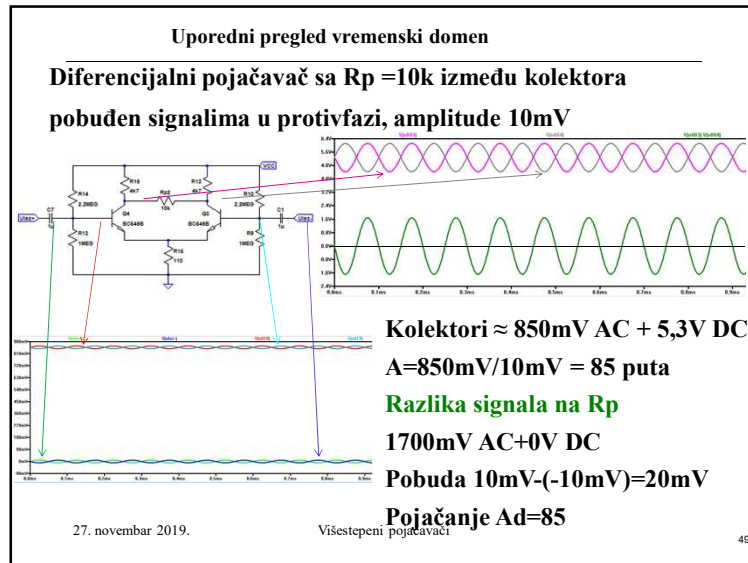
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 40



Diferencijalni i višestepeni pojačavači



Diferencijalni i višestepeni pojačavači



- Diferencijalni pojačavači**
- Parametri realnih diferencijalnih pojačavača**
1. Naponska razdešenost - ofset (*offset*)
 2. Strujna razdešenost - ofset (*offset*)
 3. Faktor potiskivanja napona napajanja
(*Power Supply Rejection Ratio - PSRR*).
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 52

Diferencijalni pojačavači

1. Naponska razdešenost - ofset

Postoji napon na izlazu i kada je $V_{UD}=0$.

Zašto? 🤔

$V_{IZ} = V_{D1} - V_{D2} = R_D(I_{D1} - I_{D2})$

- Posledica različitih I_D pri $V_{GS1} = V_{GS2}$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 53

Naponska razdešenost - ofset

Da bi se izjednačile struje, na jedan ulaz treba dovesti napon V_{OS}

V_{GS} zavisi od temperature, tako da i naponska razdešenost zavisi od temperature - drift ofset napona

$\Delta V_{OS} / \Delta T$ (x $\mu V/K$)

Manji je kod MOS nego kod bipolarnih

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 54

Naponska razdešenost - ofset

Kompenzacija naponskog ofseta

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 55

Diferencijalni pojačavač

Faktor potiskivanja napona napajanja (Power Supply Rejection Ratio – PSRR)

Koliko promene napona napajanja utiču na odziv?

$V_{iz} = A_d(V_1 - V_2) + A_{dd}V_{dd}$

$A_{dd} = \frac{V_{iz}}{V_{dd}} |_{V_{ul}=0}$

$V_{iz} = A_d[(V_1 - V_2) + \frac{1}{PSRR_{dd}} V_{dd}]$

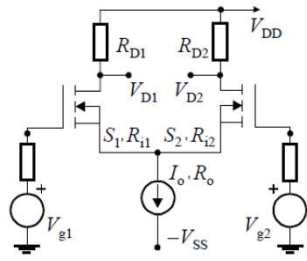
$PSRR = A_d / A_{dd}$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 56


Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Faktor potiskivanja napona napajanja

Faktor potiskivanja napona napajanja



$$PSRR \approx \frac{g_m R_D}{2}$$

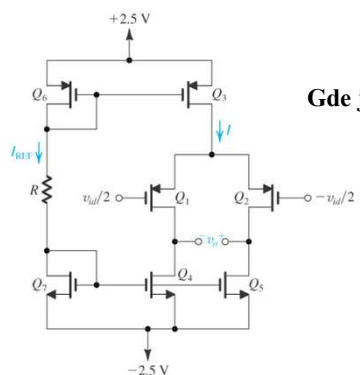
Da bi se povećao faktor potiskivanja napona napajanja treba povećati A_d , odnosno treba povećati R_D .
To je moguće uz ... 


primenu aktivnog opterećenja u drejnu.

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 57

Faktor potiskivanja napona napajanja

Bolji PSRR, A_d i ρ uz primenu aktivnog opterećenja u drejnu



Gde je ovde ulaz? Izlaz? 

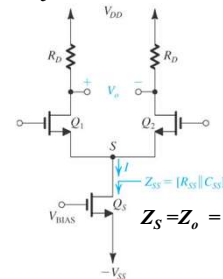
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 58

Diferencijalni pojačavač

Frekvencijska karakteristika

Definisana parazitnim kapacitivnostima

Za A_d ista kao kod pojačavača ZE (ZS)
Za A_c treba zameniti R_S sa Z_S ($R_S || C_S$)



$$A_d = -\frac{g_m R_D}{1 + s/\omega_v} = -\frac{g_m R_D}{1 + j(f/f_v)}$$

$$A_c \approx -\frac{R_D}{2Z_S} = -\frac{R_D}{2R_S} (1 + sC_S R_S)$$

$$f_Z = \frac{1}{2\pi C_S R_S}$$

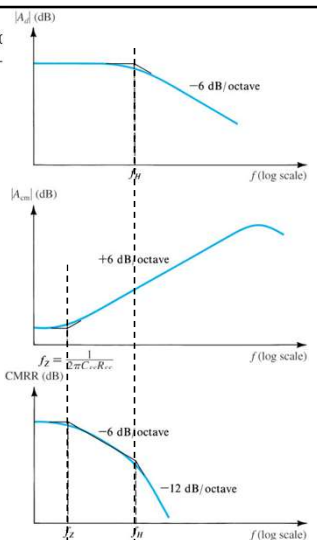
$$Z_S = Z_o = (R_o || C_o) = (R_S || C_S)$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 59

Frekvencijska karakteristika (c)

$$A_d = -\frac{g_m R_D}{1 + j(f/f_v)}$$

$$A_c = -\frac{R_D}{2R_S} (1 + j(f/f_Z))$$

$$\rho = \frac{2g_m R_S}{(1 + j(f/f_v))(1 + j(f/f_Z))}$$


27. novembar 2019. Višest. 60

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega




Višestepeni pojačavači

27. novembar 2019. 61


Višestepeni pojačavači

62


Sadržaj

- 1. Zašto višestepeni?** 
 - Da li smo do sada pominjali neke višestepene? 
- 2. Kako se realizuju?** 
- 3. Osobine idealnih i realnih višestepenih pojačavača**
 - Pojačanje
 - Frekvencijska karakteristika

27. novembar 2019. 63

Zašto višestepeni pojačavači? 

Da bi se dobili BOLJI pojačavači.

Koji su bolji? 

Sličniji idealnim:

- veće pojačanje
- optimalna ulazna otpornost
- optimalna izlazna otpornost
- bolje frekvencijske karakteristike (ALI...)

Za naponske pojačavače to znači:

- Veće pojačanje napona
- Ulazna otpornost **VEĆA**
- Izlazna otpornost **MANJA**

30. novembar 2010 Višestepeni pojačavači

64

Zašto višestepeni pojačavači? 🤔

Jedan pojačavački stepen obično nije dovoljan da bi se postiglo željeno pojačanje **od generatora do potrošača**.
 Veće pojačanje može da se postigne spregom više osnovnih pojačavačkih stepena (OP).

Kaskadna veza pojačavača

30. novembar 2010 Višestepeni pojačavači 65

Princip povezivanja višestepenih pojačavača

Za prvi stepen vezuje se pobudni generator čija je unutrašnja otpornost R_g .
 Za izlaz poslednjeg stepena vezuje se potrošač R_p .
 Vezuju se za isti napon napajanja

27. novembar 2019. 66

Princip povezivanja višestepenih pojačavača

Idealno: DC radna tačka svakog stepena postavlja se nezavisno za savaki stepen posebno.
 Ovo implicira da su pojedini stepeni međusobno razdvojeni za jednosmerne signale (*Medutim ...*).
 Mora da postoji sprega za naizmenične signale.
 Kolo za spregu?

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 67

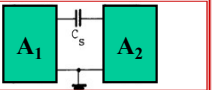
Kako se realizuju višestepeni pojačavači? 🤔

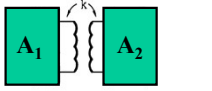
Kako razdvojiti DC a ne oslabiti AC?
 Šta čini kolo za spregu "S"?

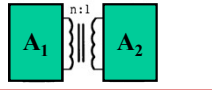
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 68

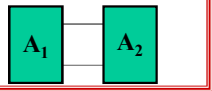
Kako se realizuju višestepeni pojačavači

Vrste spregu:

Kapacitivna 

Induktivna 

Transformatorska 

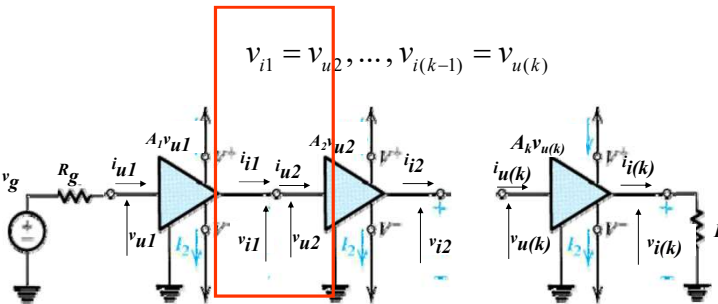
Direktna 

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 69

Osobine višestepenih pojačavača

Idealno kolo za spregu ne slabi naizmenične, a blokira jednosmerne signale.

Tada za naizmenične signale važi:

$$v_{i1} = v_{u2}, \dots, v_{i(k-1)} = v_{u(k)}$$


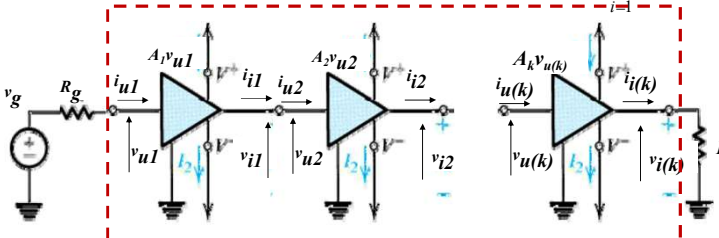
27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 70

Osobine višestepenih pojačavača

Pojačanje

$$A = \frac{v_{ik}}{v_{u1}} = \frac{v_{ik}}{v_{u(k)}} \cdot \frac{v_{u(k)}}{v_{i(k-1)}} \cdot \dots \cdot \frac{v_{i2}}{v_{i1}} \cdot \frac{v_{i1}}{v_{u1}} = A_k A_{k-1} \dots A_2 A_1 = \prod_{i=1}^k A_i$$

Pojačanje u dB? 🤔

$$a[\text{dB}] = a_k[\text{dB}] + a_{k-1}[\text{dB}] + \dots + a_2[\text{dB}] + a_1[\text{dB}] = \sum_{i=1}^k a_i[\text{dB}]$$


27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 71

Osobine višestepenih pojačavača

Realni:

Pojačanje pojedinih stepena nije jednako pojačanju neopterećenih pojačavača!

Svaki prethodni stepen opterećen je ulaznom otpornošću narednog.

Svaki naredni stepen pobuđuje se preko izlazne otpornosti prethodnog.

ZATO SU VAŽNE ULAZNE/IZLAZNE OTPORNOSTI!

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 72

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Za naizmenični signal, m -ti stepen u pojačavačkom lancu okarakterisan je pojačanjem A_{om} (naponskim/strujnim), ulaznom otpornošću R_{um} i izlaznom otpornošću R_{im} .

Za naponski:

$$A_m = \frac{v_{im}}{v_{um}} = A_{om} \frac{R_{u(m+1)}}{R_{u(m+1)} + R_{im}}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 73

Realni: Osobine višestepenih pojačavača Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje $A_u = \frac{v_{i(k)}}{v_g} = \frac{v_{i(k)}}{v_{i(k-1)}} \dots \frac{v_{i2}}{v_{i1}} \frac{v_{u1}}{v_g}$

$$A_u = \frac{v_{i(k)}}{v_{u(k)}} \dots \frac{v_{i2}}{v_{u2}} \frac{v_{i1}}{v_{u1}} \frac{v_{u1}}{v_g}$$

$$A_u = A_k A_{k-1} \dots A_2 A_1 \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 74

Realni: Osobine višestepenih pojačavača Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje

$$A_u = \frac{R_p}{R_p + R_{i(k)}} A_{o(k)} \frac{R_{u(k)}}{R_{u(k)} + R_{i(k-1)}} A_{o(k-1)} \dots \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} A_{o1} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g}$$

$$A_u = \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} \frac{R_p}{R_p + R_{i(k)}} \left(\prod_{i=1}^k A_{oi} \right) \left(\prod_{i=2}^k \frac{R_{u(i)}}{R_{u(i)} + R_{i(i-1)}} \right)$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 75

Realni: Osobine višestepenih pojačavača Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje pri VF

$$A_{uv}(s) = \frac{Z_{u1}}{Z_{u1} + R_g} \frac{R_p}{R_p + Z_{i(k)}} \left(\prod_{i=1}^k A_{ov(i)}(s) \right) \left(\prod_{i=2}^k \frac{Z_{u(i)}}{Z_{u(i)} + Z_{i(i-1)}} \right)$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 76

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF, opterećen sa R_p i pobuđen realnim generatorom sa R_g

Neka su svi pojačavački stepeni identični (isto A_0 , ω_v) sa realnim ulaznim (R_u) i izlaznim otpornostima (R_i) i

$$A_{ov(i)}(s) = \frac{A_{0(i)}}{1 + j\omega / \omega_{v(i)}} = \frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_v}$$

$$A_{uv}(s) = K \left(\frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_v} \right)^k = K \frac{A_0^k}{(1 + j\omega / \omega_v)^k}$$

gde je

$$K = \frac{R_u}{R_u + R_g} \frac{R_p}{R_p + R_i} \left(\frac{R_u}{R_u + R_i} \right)^{k-2}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 77

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF

gornja granična frekvencija definisana je sa

$$A_{uv}(\omega_{uv}) = K \frac{A_0^k}{(1 + j\omega_{uv} / \omega_v)^k} = \frac{KA_0^k}{\sqrt{2}}$$

$$\omega_{uv} = \omega_v \sqrt[k]{\sqrt{2} - 1} < \omega_v$$

Ukupno pojačanje raste sa k-tim stepenom!

Ukupni propusni opseg se sužava - smanjuje!

Ukupni propusni opseg manji je od najužeg propusnog opsega pojedinačnog pojačavača

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 78

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF za 1, 2 i 4 stepena

$$A_4(\omega) = A_1(\omega)A_1(\omega)A_1(\omega)A_1(\omega) = \frac{A_1^4}{(1 + j\omega / \omega_v)^4}$$

$$A_2(\omega) = A_1(\omega)A_1(\omega) = \frac{A_1^2}{(1 + j\omega / \omega_v)^2}$$

$$A_1(\omega) = \frac{A_1}{(1 + j\omega / \omega_v)}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 79

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Pojedini pojačavački stepeni mogu biti upotrebljeni za prilagodjenje (naponsko ili strujno) sa generatorom i/ili potrošačem izmedju kojih treba da se nadje osnovni pojačavač čija je glavna namena pojačanje napona.

Stepen sa zajedničkim emitorom/sorsom ima zadatak da obezbedi potrebno naponsko pojačanje, dok se stepen ZB/ZG koristi za strujno a ZC/ZD za naponsko prilagođenje.

Kolike su vrednosti ulazne/izlazne otpornosti ZB/ZG i ZC/ZD?

Videti petu i šestu nedelju predavanja

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 80

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Kapacitivna sprega: povezuje $R_{i(n-1)}$ i $R_{u(n)}$ preko C zato se zove i RC sprega

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 81

Realni: RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku
Razmotrimo spregu između 1. i 2. stepena.
Pri NF reaktansa kondenzatora nije zanemariva.
Za $f=0, X_{C_S} \rightarrow \infty$; prekid za DC

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 82

Realni: RC sprega Za one koji žele da nauče više

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

$$A_n = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = A_{01} \frac{R_{u2}}{R_{i1} + \frac{1}{j\omega C_C} + R_{u2}}$$

$$A_n = A_{01} \frac{j\omega C_C R_{u2}}{1 + j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A_n = A_{01} \frac{R_{u2}}{(R_{i1} + R_{u2})} \frac{j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}{1 + j\omega C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A_n = A_0 \frac{j\omega \tau_C}{1 + j\omega \tau_C} \quad A_n = A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 83

Realni: RC sprega

$$\omega_n = \frac{1}{C_C (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A(f) = A_0 \frac{j \frac{f}{f_n}}{1 + j \frac{f}{f_n}}$$

$$A(s) = A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n} = A_0 \frac{s / \omega_n}{1 + s / \omega_n}$$

Doprinos kondenzatora za spregu odgovara doprinosu filtra propusnika visokih frekvencija.

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 84

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Realni: RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

Pretpostavimo da je k pojačavača vezano kaskadno i da su pojačavači identični tako da je:

$$\omega_{n1} = \omega_{n2} = \dots = \omega_{nk} = \omega_n$$

$$A_{un} = \left(A_0 \frac{j\omega / \omega_n}{1 + j\omega / \omega_n} \right)^k$$

Tada će granična frekvencija biti:

$$\omega_{un} = \frac{\omega_n}{\sqrt{k\sqrt{2}-1}} > \omega_n$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 85

Realni: RC sprega Za one koji žele da nauče više

Potrošač priključen za pojačavač preko C_{S2}

$$A_{vn} = \frac{V_p}{V_g} = A_1 \frac{R_u j\omega C_{C1}}{1 + j\omega C_{C1}(R_u + R_g)} \frac{R_p j\omega C_{C2}}{1 + j\omega C_{C2}(R_p + R_i)}$$

$$\tau_{C1} = C_{C1}(R_g + R_u) \quad \tau_{C2} = C_{C2}(R_i + R_p)$$

$$A_n = A_1 \frac{j\omega\tau_{C1}}{1 + j\omega\tau_{C1}} \frac{j\omega\tau_{C2}}{1 + j\omega\tau_{C2}}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 86

Realni: RC sprega Za one koji žele da nauče više

Pojačavač sa C u sorsu/emitoru (C_S ili C_E) na NF

Ima tri pola, dominantni uz C_S (C_E)

$$\tau_{C1} = C_{C1}(R_g + R_u)$$

$$\tau_{p2} = C_S / g_m \text{ MOSFET}$$

$$\tau_{p2} = C_E (r_e + R_B / (\beta + 1)) \approx C_E r_e \text{ BJT}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 87

Realni: RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri VF može da se zanemari.

Na VF utiču parazitne kapacitivnosti (Milerov efekat).

Dolazi do izražaja kompleksni oblik Z_u i Z_i .

Tranzistori se **ne ponačaju unilateralno**.- deo signala sa izlaza vraća se ka ulazu

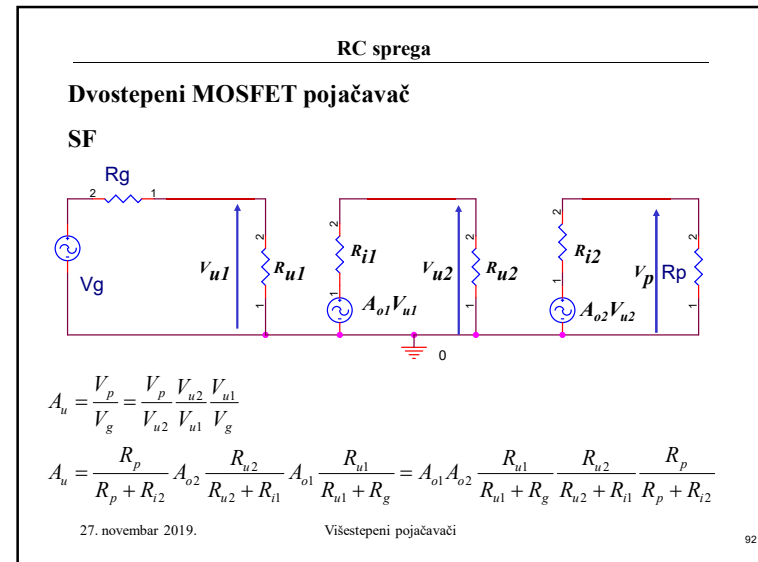
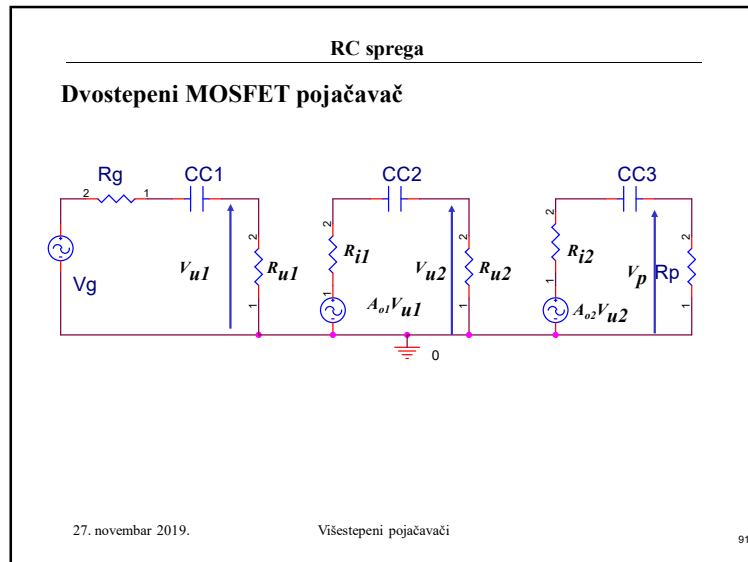
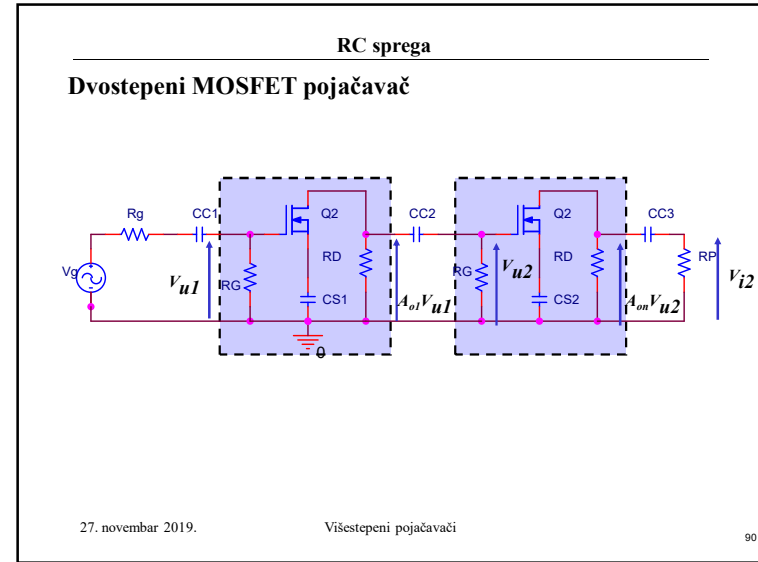
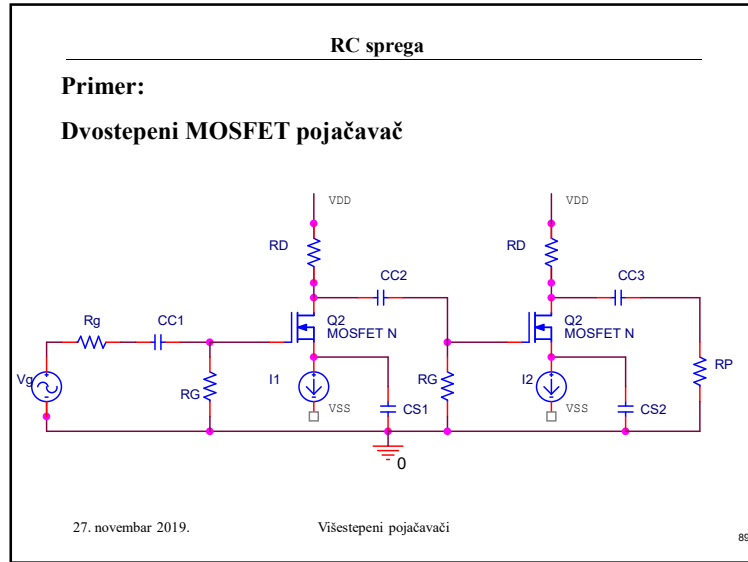
Na Z_u narednog stepena utiče opterećenje sa izlaza.

Na Z_i prethodnog stepena utiče Z iz pobude.

Zato je analiza veoma složena i obavlja se uz pomoć računara.

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 88

Diferencijalni i višestepeni pojačavači



RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF

$$A_{o1} = A_{o2} = -g_m R_D$$

$$R_{u1} = R_{u2} = R_G$$

$$R_{i1} = R_{i2} = R_D \parallel r_o \approx R_D$$

$$A_u = (g_m R_D)^2 \frac{R_G}{R_G + R_g} \frac{R_G}{R_G + R_D} \frac{R_p}{R_p + R_D} \approx (g_m R_D)^2 \quad \text{Za } R_G \gg R_g, R_D, R_p \gg R_D$$

93

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

$$A_u = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_{u2}} \frac{V_{u2}}{V_{u1}} \frac{V_{u1}}{V_g}$$

$$A_u = \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g + 1/j\omega C_{c1}} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1} + 1/j\omega C_{c2}} A_{o1} \frac{R_p}{R_p + R_{i2} + 1/j\omega C_{c3}} A_{o2}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 94

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{c1} R_{u1}}{1 + j\omega C_{c1} (R_{u1} + R_g)} \frac{j\omega C_{c2} R_{u2}}{1 + j\omega C_{c2} (R_{u2} + R_{i1})} \frac{j\omega C_{c3} R_p}{1 + j\omega C_{c3} (R_p + R_{i2})}$$

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{c1} R_g}{1 + j\omega C_{c1} (R_g + R_g)} \frac{j\omega C_{c2} R_g}{1 + j\omega C_{c2} (R_g + R_D)} \frac{j\omega C_{c3} R_p}{1 + j\omega C_{c3} (R_p + R_D)}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 95

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

$$A_{o1}(j\omega) = A_{o2}(j\omega) \approx -g_m R_D \frac{j(\omega/\omega_{p2})}{1 + j(\omega/\omega_{p2})}; \quad \omega_{p2} = g_m / C_S;$$

$$C_{c1} = C_{c2} = C_{c3} = C_c$$

$$A_u \approx (g_m R_D)^2 \frac{(j\omega C_c)^3 R_G^2 R_p}{(1 + j\omega C_c R_G)^2} \frac{1}{1 + j\omega C_c (R_p + R_D)} \left(\frac{j(\omega/\omega_{p2})}{1 + j(\omega/\omega_{p2})} \right)^2$$

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{c1} R_g}{1 + j\omega C_{c1} (R_g + R_g)} \frac{j\omega C_{c2} R_g}{1 + j\omega C_{c2} (R_g + R_D)} \frac{j\omega C_{c3} R_p}{1 + j\omega C_{c3} (R_p + R_D)}$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 96

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF

Kapacitivnosti za spregu C_{C1} i C_{C2} i C_S predstavljaju kratak spoj na VF.

Dominiraju parazitne kapacitivnosti tranzistora.

27. novembar 2019.
Višestepeni pojačavači
97

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF

Tranzistor nije unilateralan usled C_{gd}

27. novembar 2019.
Višestepeni pojačavači
98

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF

Analiza na VF je složena jer tranzistori nisu unilateralni, tako da Z_u zavisi od opterećenja na izlazu, a Z_i od opterećenja na ulazu.

27. novembar 2019.
Višestepeni pojačavači
99

Direktna sprega

Direktna sprega - primena u IC Za one koji žele da nauče više

Problemi – izazovi

- polarizacija aktivne komponente u narednom stepenu (radna tačka u aktivnoj oblasti, a jednosmerni signal na ulazu je veliki jer je definisan radnom tačkom na izlazu prethodnog stepena).

27. novembar 2019.

100

Direktna sprega Za one koji žele da nauče više

Direktna sprega - primena u IC

Problemi – izazovi

- nestabilnost jednosmernih nivoa na izlazu usled međusobne zavisnosti DC nivoa (svi su u vezi sa svima).

Ključno je stabilizovati prvi stepen jer ga ostali “prate” i pojačavaju efekte

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 101

Direktna sprega Za one koji žele da nauče više

Dvostepeni ZS

Velika razlika između napona na drejnu prvog i gejtu drugog “skida” se preko razdelnika napona

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 102

Direktna sprega Za one koji žele da nauče više

Dvostepeni ZS

Velika razlika između napona na drejnu prvog i gejtu drugog “skida” se ubacivanjem rednih dioda

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 103

Direktna sprega

Uobičajeno je da se koristi dinamička otpornost MOS tranzistora umesto R.

U CMOS IC, RT svakog stepena (grane) podešava se preko izvora referentnih napona i struja.

Izvore konstantne struje smo pominjali.

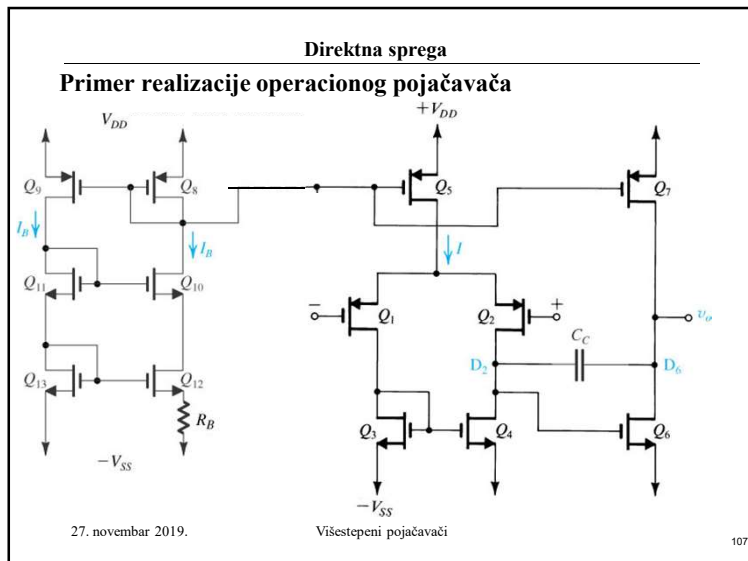
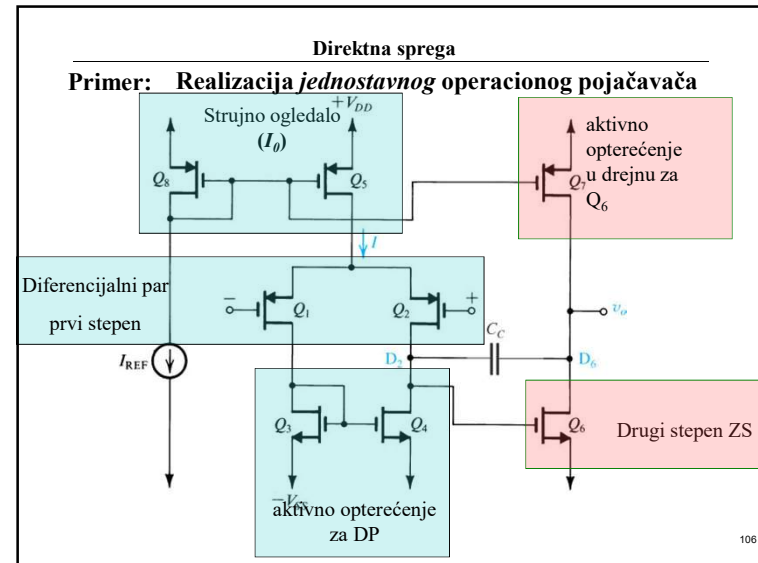
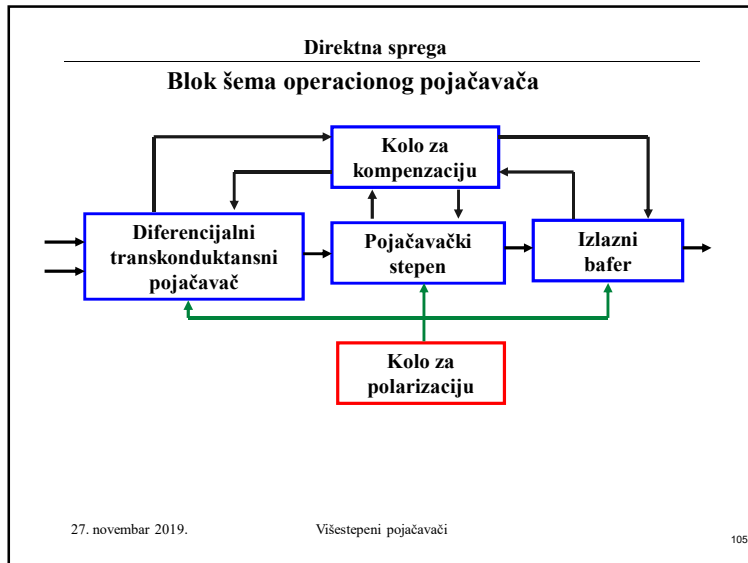
Pojedinim granama podešava se RT korišćenjem složenijih *strujnih ogledala*.

Za definisanje referentne struje i RT* neophodno je obezbediti polarizaciju preko izvora referentnog napona.

(* Npr. za ZG kod kaskodnih pojačavača)

104

Diferencijalni i višestepeni pojačavači




Domaći 8.3: Realizacija sa MOST

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa $\mu_n C_{ox}=160\mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_{tn}=0.7\text{V}$, $\mu_p C_{ox}=40\mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_{tp}=-0.8\text{V}$, $V_{An}=-V_{Ap}=-10\text{V}$.
 Dimenzije tranzistora date su u tabeli
 Poznato je $I_{REF}=90\mu\text{A}$, $V_{DD}=V_{SS}=2.5\text{V}$.

Za one koji žele da nauče više

Dopunite podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.
 Sugestija: Najpre odrediti pojačanje svakog stepena posebno.

	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈
W/L	20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8
I _D (μA)								
V _{GS} (V)								
g _m (mA/V)								
r _o (k Ω)								


Diferencijalni i višestepeni pojačavači 

Šta smo naučili?

- Zašto se koriste višestepeni pojačavači?**
 - Električna šema, princip rada i osobine diferencijalnog pojačavača (MOS ili BJT).
 - Višestepeni pojačavač napona: blok šema, ukupno pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora.
 - Frekvencijske karakteristike višestepenih pojačavača sa RC spregom.

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

27. novembar 2019. Jednostepeni MOSFET pojačavači 109

Diferencijalni i višestepeni pojačavači 

Ispitna pitanja?

- Varijante realizacije diferencijalnih pojačavača (ulazni izlazni priključci, polarizacija i dinamičko opterećenje)
- Diferencijalno pojačanje ulaznih signala diferencijalnih pojačavača (MOS ili BJT).
- Pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala diferencijalnih pojačavača (MOS ili BJT).
- Parametri diferencijalnih pojačavača (CMRR, naponski ofset, PSRR, uzroci efekti i korekcija)
- Naponsko pojačanje m-tog pojačavača u kaskadnoj vezi.
- Načini realizacije kola za spregu pojačavača.
- Ukupno naponsko pojačanje opterećenog dvostepenog pojačavača sa zajedničkim sorsom povezanih preko kondenzatora za spregu, pobuđen iz realnog izvora.
- Frekvencijske karakteristike dvostepenog pojačavača sa zajedničkim sorsom povezanih preko kondenzatora za spregu.


27. novembar 2019. Jednostepeni MOSFET pojačavači 110

Višestepeni pojačavači

Sledećeg časa

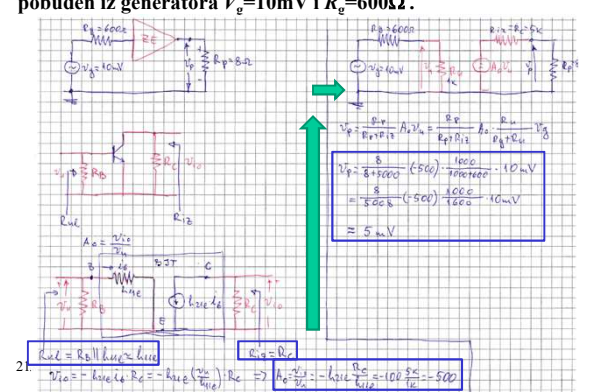
Pojačavači sa negativnom povratnom spregom

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 111

2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom 

Rešenje Domaći 7.1:

Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri: $R_C=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$, ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$.



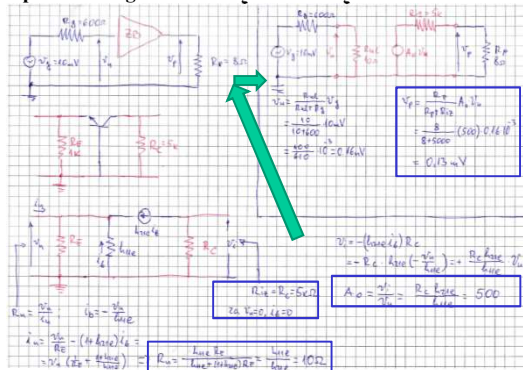
2

112

3. Pojačavač sa zajedničkom bazom

Rešenje Domaći 7.2:

Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri: $R_C=5k$, $R_B=1k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$, ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$.



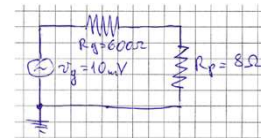
113

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rešenje domaći 7.3:

Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$ u slučaju da je povezan:

a) Direktno;



$$V_p = \frac{R_p}{R_p + R_g} V_g = \frac{8}{8 + 600} \cdot 10mV$$

$$V_p = \frac{8}{608} \cdot 10mV = 0,13mV$$

21. novembar 2017.

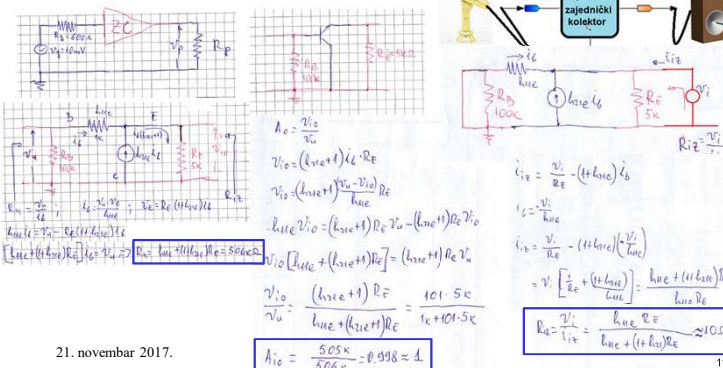
Jednostepeni pojačavači sa BJT

114

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rešenje domaći 7.3: Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$ u slučaju da je povezan:

b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri: $R_E=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$;



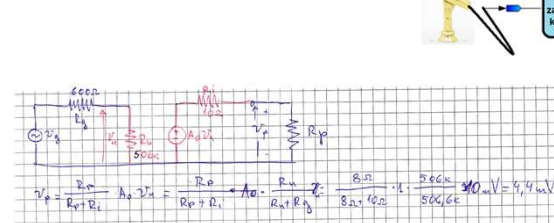
21. novembar 2017.

115

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rešenje domaći 7.3 (nastavak): Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$ u slučaju da je povezan:

b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri: $R_E=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$;



21. novembar 2017.

116

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rešenje domaći 7.3 (nastavak): Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ ako je pobuden iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$ u slučaju da je povezan:

c) preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz domaćeg zadatka 7.1 (ulaz vezan za mikrofon) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za zvučnik, R_p).

21. novembar 2017. Jednostepeni pojačavači sa BJT 117

Statička prenosna karakteristika sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Strujna

$$I_{C1} = f_1(V_{B1} - V_{B2})$$

$$I_{C2} = f_2(V_{B1} - V_{B2})$$

$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$

$$I_{C1} + I_{C2} \approx I_o$$

V_{BE1} menjamo:
 V_{BE1} malo, T1 zakočen $\rightarrow V_{CE1}=V_{CC}, I_{C2}=I_o$

V_{BE1} raste, T1 vodi $\rightarrow I_{C1} \uparrow, V_{CE1} \downarrow; I_{C2} \downarrow, V_{CE2} \uparrow$

za veliko V_{BE1} , $I_{C1max} = I_o, V_{CE1min} = V_{CC} - I_o R_C$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 118

Statička prenosna karakteristika BJT

Za one koji žele da nauče više

Raspon (dinamika) izlaznog signala

$$(V_{iz})_{max} = (V_{C1} - V_{C2})_{max} = V_{CC} - (V_{CC} - R_C I_o) = R_C I_o$$

$$(V_{iz})_{min} = (V_{C1} - V_{C2})_{min} = (V_{CC} - R_C I_o) - V_{CC} = -R_C I_o$$

$$\Delta V_{iz} = (V_{izmax}) - (V_{izmin}) = 2R_C I_o$$

Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa R_C i I_o .

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavači 119

Statička prenosna karakteristika BJT

Za one koji žele da nauče više

Raspon (dinamika) ulaznog signala?

$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$

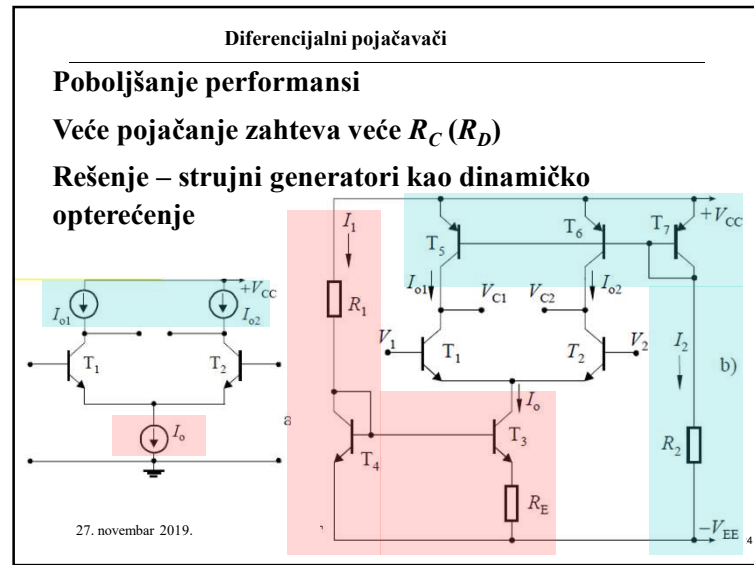
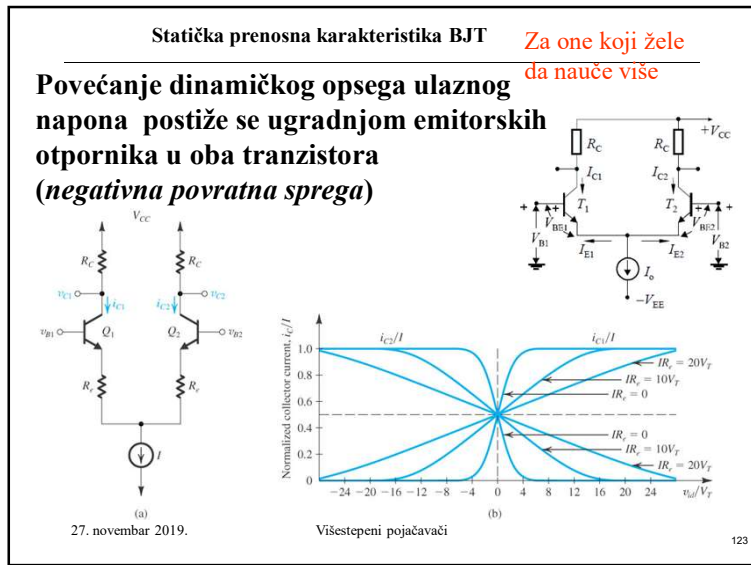
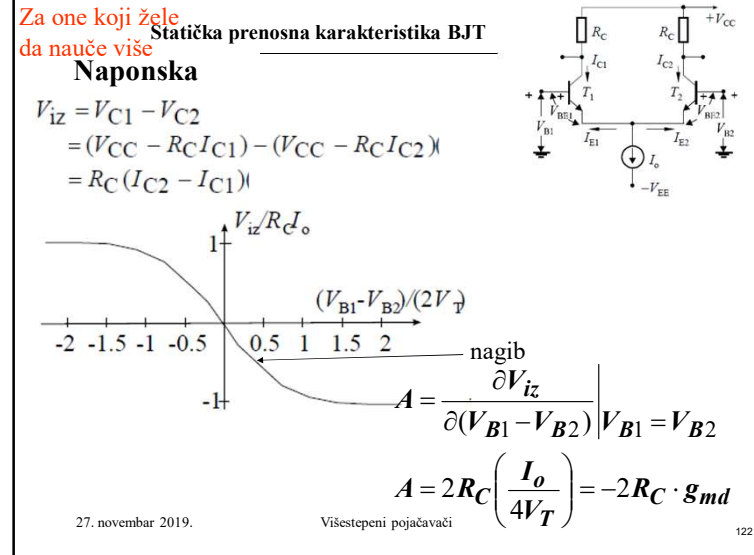
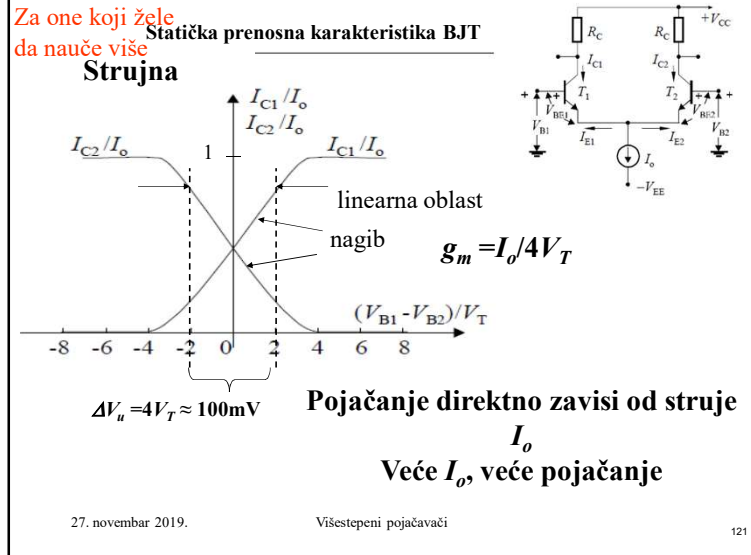
$$V_{B1} - V_{B2} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

$$-I_E = I_s e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_{C1} = -I_{E1} = \frac{I_o}{1 + e^{-(V_{B1} - V_{B2})/V_T}}$$

$$\Delta V_u = 4V_T \approx 100mV$$

27. novembar 2019. Višestepeni pojačavač $\Delta V_u = 4V_T \approx 100mV$ 120



Za one koji žele da nauče više

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2019. 125

Za one koji žele da nauče više

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – tranzistori sa većim β

Veća ulazna otpornost

Rešenje – Darlingtonov par

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2019. 128

Za one koji žele da nauče više

Direktna sprega

Direktnom spregom može da se se postigne veće β i veća ulazna otpornost tranzistora

Darlingtonova sprega

$\beta_e = \beta_1 \beta_2$

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2019. 127

Za one koji žele da nauče više

Direktna sprega

Darlingtonova sprega

ZC-ZC veza

Velika ulazna, mala izlazna otpornost

I obezbeđuje da Q_1 radi u oblasti sa velikim β

Višestepeni pojačavači

27. novembar 2019. 128

Strujna razdešenost - ofset

Za one koji žele
da nauče više

Strujni ofset

Usled nesavršenosti proizvodnje, diferencijalni par imaće različito β .

Zato će se razlikovati I_C čak i kada su I_B iste.

$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2} =$$

$$= \left(\frac{I_{C1}}{\beta_1} - I_1\right) - \left(\frac{I_{C2}}{\beta_2} - I_2\right)$$

Tipična vrednost strujnog ofseta iznosi 10% nominalne vrednosti struje baze.

I zbog toga je potrebno da I_B budu male (znači: R_u veliko, tranzistori sa velikim β)

I_{OS} zavisi od temperature

Strujna razdešenost - ofset

Za one koji žele
da nauče više

Kompensacija strujnog ofseta

$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2} =$$

$$= \left(\frac{I_{C1}}{\beta_1} - I_1\right) - \left(\frac{I_{C2}}{\beta_2} - I_2\right)$$

27. novembar 2019. Višest 130