

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe.	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (Kasno za kajanje)	50%	20%
Kolokvijum II (20.01.2018.)	50%	20%



120% 60%

Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: NAUČITE, POLOŽITE preko kolokvijuma MNOGO JE LAKŠE!

28. novembar 2017.

1

Diferencijalni pojačavači

3

Da se podsetimo



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

Ali pre toga...

Da li i kako mogu da se poboljšaju osobine?

28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

2

Sadržaj

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

28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

4

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

Osobine

Želja:

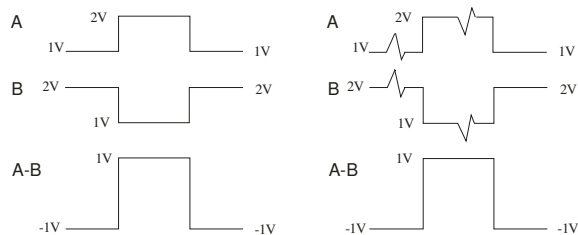
- Što veće pojačanje razlike ulaznih signala.
 - Što manje pojačanje srednje vrednosti ulaznih signala.
- Što veća ulazna otpornost.
- Što manja izlazna otpornost.

Kako ispuniti ovu želju?



Zašto diferencijalni ?

Poništavanje smetnji:



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?

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.

28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

9

Realizacija diferencijalnog pojačavača

Dva sa ZS (ZE).



Biramo najbolje rešenje:

Zbog stabilnosti – otpornost u sorsu (emitoru).

Zbog pojačanja što veća dinamička otpornost u dregnu/kolektoru.

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

28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

11

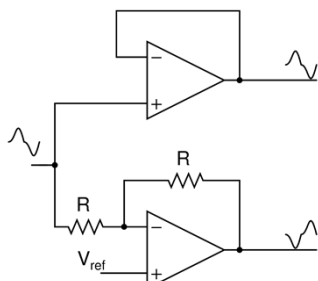
Kako diferencijalni signal ?

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza.



Kako napraviti diferencijalni signal?

Kombinovanjem invertorskog i neinvertorskog pojačavača



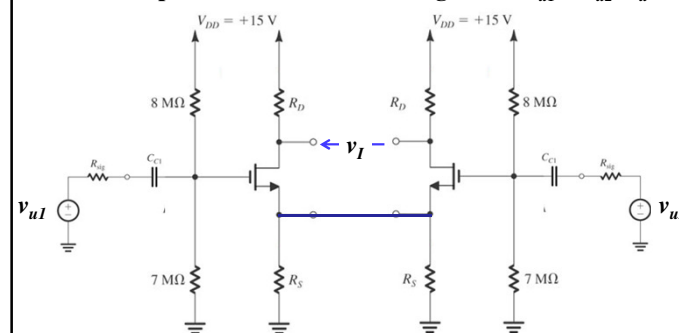
28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

10

Princip rada

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



28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

12

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Princip rada

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

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 13

Princip rada

Moguće kombinacije:

Asimetrični ulaz

Asimetrični izlaz

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 15

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.**

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 14

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:

Dva simetrična ulaza
Dva simetrična izlaza
Ulazni signali:
Korisni: signal razlike (diferencijalni)

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

$$v_{UD} = v_{ud} = v_{g1} - v_{g2}$$

Korisni: signal razlike na izlazu (diferencijalni)

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

$$V_{D1} = (V_{DD} - R_D \frac{I}{2}) = V_{D2}$$

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 16

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 $v_{d1} = -v_{d2}$

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

28. novembar 2017. 17

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

CMRR (Common Mode Rejection Ratio): $\rho = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$

Pokazuje koliko puta je pojačanje razlike veće od pojačanja srednje vrednosti

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 19

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 $v_{d1} = -v_{d2}$

$$v_{ICM} = v_{IC} = V_D$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 18

Realizacija sa MOST

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

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

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

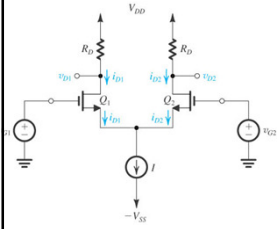
$$\begin{cases} g_m \equiv S \\ r_o \equiv R_i \\ g_m r_o \equiv \mu \end{cases}$$

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“.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 20

Realizacija sa MOST



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

CMRR veće za veće R_S

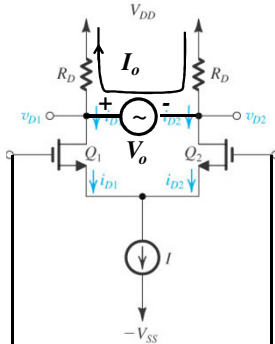
Zato? 🤔

izvor konstantne struje umesto R_S .

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 21

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0 .



Izlazna otpornost

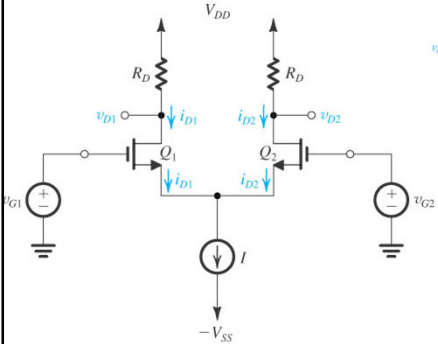
$$R_i = \frac{V_o}{I_o} = R_{D1} + R_{D2} = 2R_D$$

Dva puta veća nego kod pojačavača sa ZS!!!

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 23

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0 .



Za simetrični izlaz

$$A_c = 0.$$

$$A_d = -g_m R_D.$$

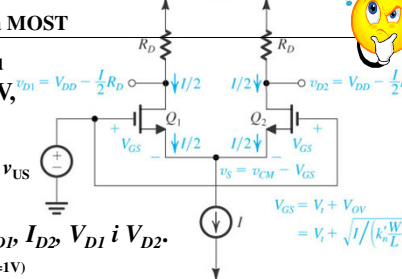
$$\rho \rightarrow \infty$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 2

Domaći 8.1: Realizacija sa MOST 🤔

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa $V_t=0.5V$, $v_{D1}=v_{D2}=V_{DD}-\frac{1}{2}R_D I$, $I_{D1}=I_{D2}=0.2mA$, $V_{D1}=V_{D2}=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$, $\lambda=0$.

Poznato je $I=0.4mA$, $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$ i $R_D=2.5k\Omega$.



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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači E7.1 24

Realizacija sa BJT

Primer BJT pojačavač:

Za one koji žele da nauče više

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

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 $h_{22E}=1/R_0=25 \text{ }\mu\text{A/V}$, 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 .**

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

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

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

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

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

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

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

$\approx -\frac{R_C}{2R_E}$ **Pojačanje sa ZE**

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Wilsonov strujni izvor - veće R_E .

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

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

Višestepeni pojačavači

29

28. novembar 2017.

Realizacija sa MOF Za one koji žele da nauče više

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 $R_C=10k\Omega$, $v_{BE1}=5+0.005\sin(\omega t)V$
 $v_{BE2}=5-0.005\sin(\omega t)V$.

Određiti

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

Višestepeni pojačavači

31

28. novembar 2017.

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**

Višestepeni pojačavači

30

28. novembar 2017.

Realizacija sa BJT Za one koji žele da nauče više

MOS v.s. BJT

$R_{uMOS} > R_{uBJT}$

$g_{mMOS} < g_{mBJT}$

MOST teže se uparuje od BJT

Višestepeni pojačavači

32

28. novembar 2017.

Diferencijalni pojačavači

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

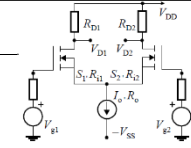
Statička –
 za spore signale – bez reaktivnih elemenata

Dinamička –
 za VF – sa reaktivnim elementima

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 33

Statička prenosna karakteristika MOST

Raspon (dinamika) izlaznog signala



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

$$V_{izmax} = I_o R_D$$

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

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

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

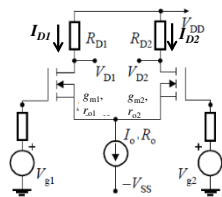
Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa R_D i I_o .

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 35

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, $I_{D2} = I_o$,
 $V_{DS2min} = V_{DD} - I_o R_D$



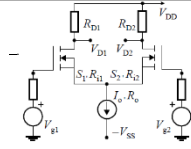
V_{G1} raste, T1 provede:
 $I_{D1} + I_{D2} = I_o = Const.$
 $I_{D1} \uparrow, I_{D2} \downarrow, V_{DS1} \downarrow, V_{DS2} \uparrow$

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

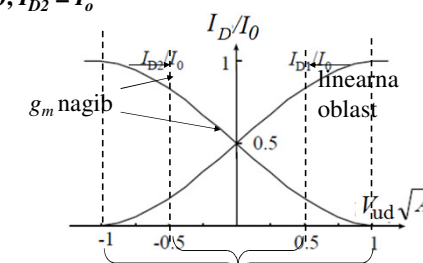
28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 34

Statička prenosna karakteristika MOST

Raspon (dinamika) ulaznog signala? Ograničen oblašću rada oba MOST u zasićenju

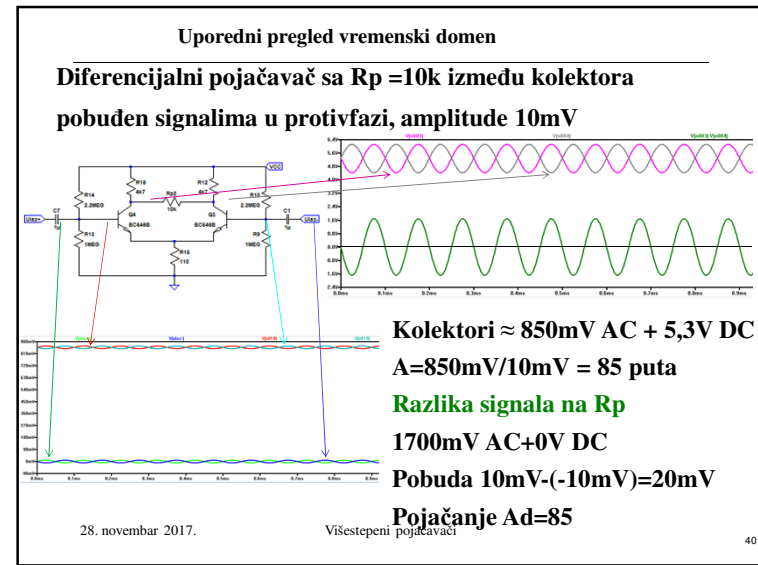
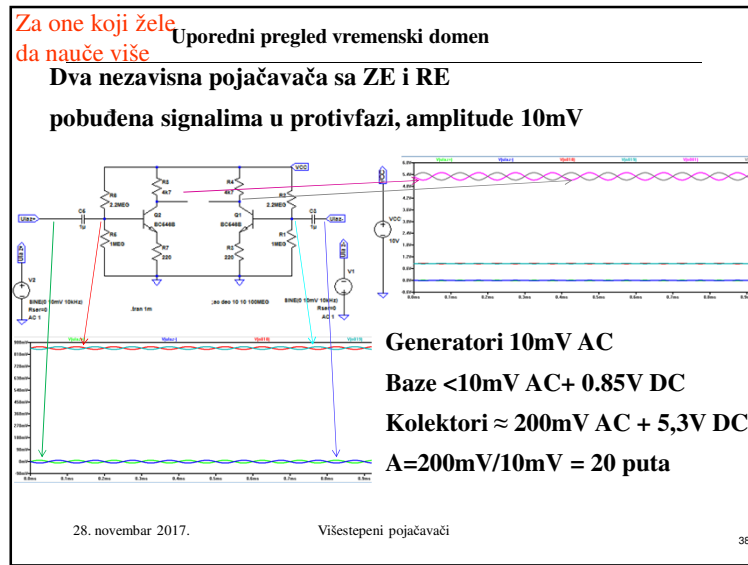
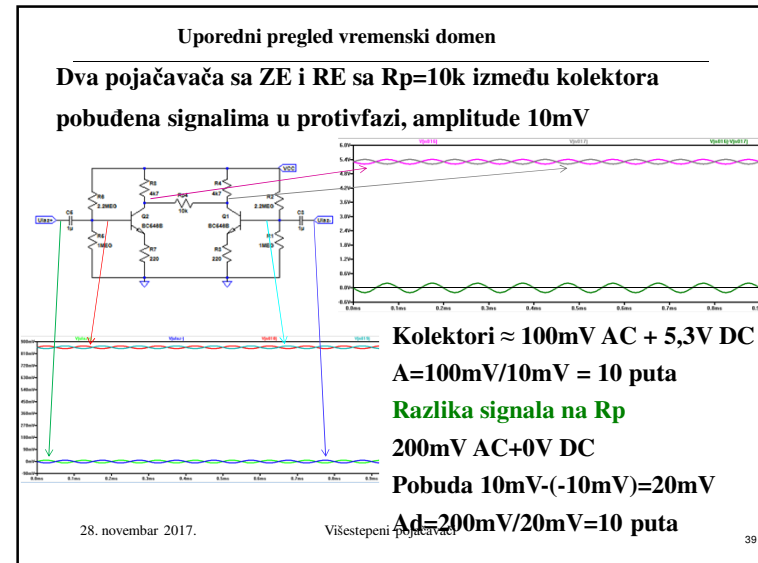
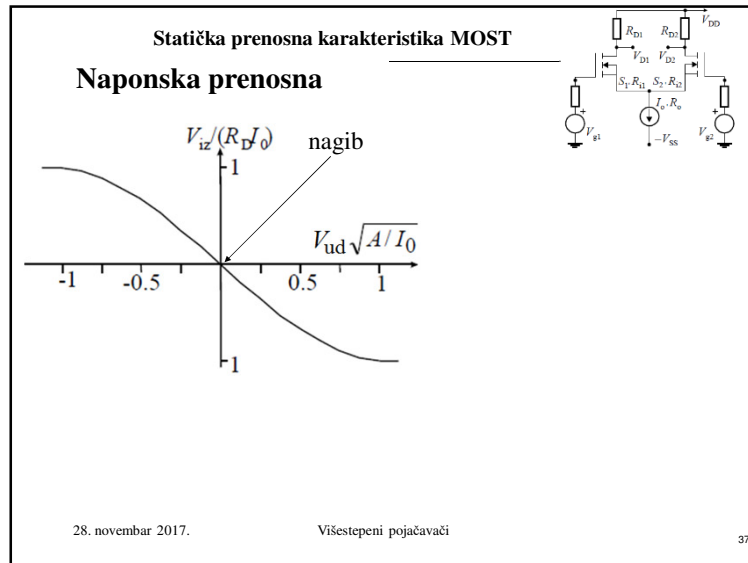


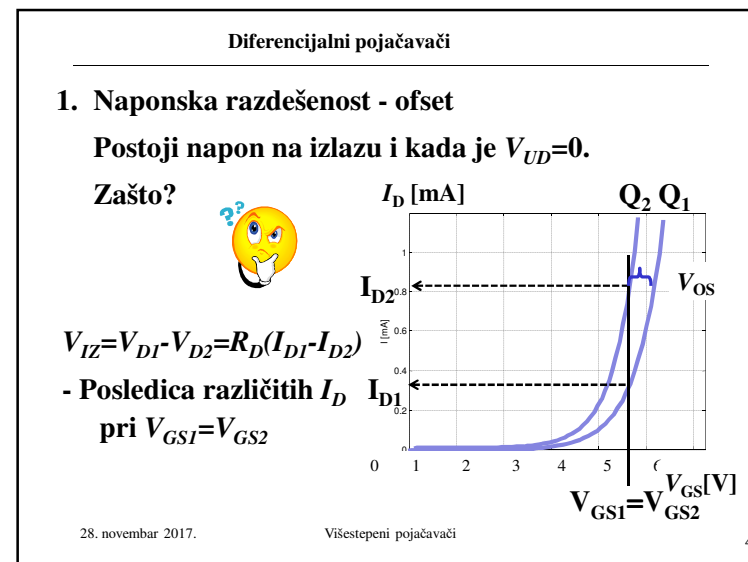
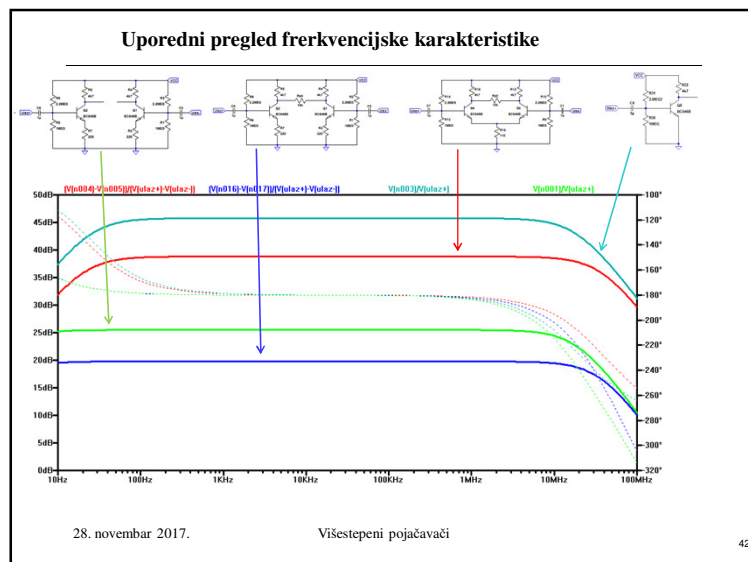
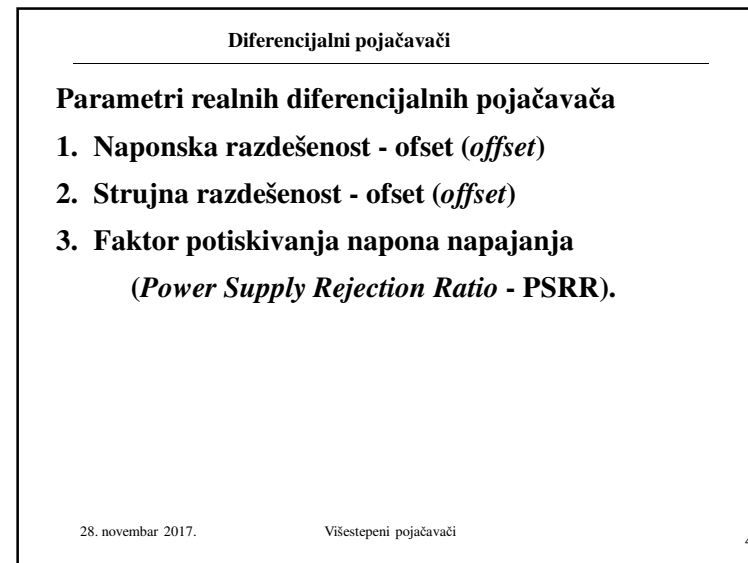
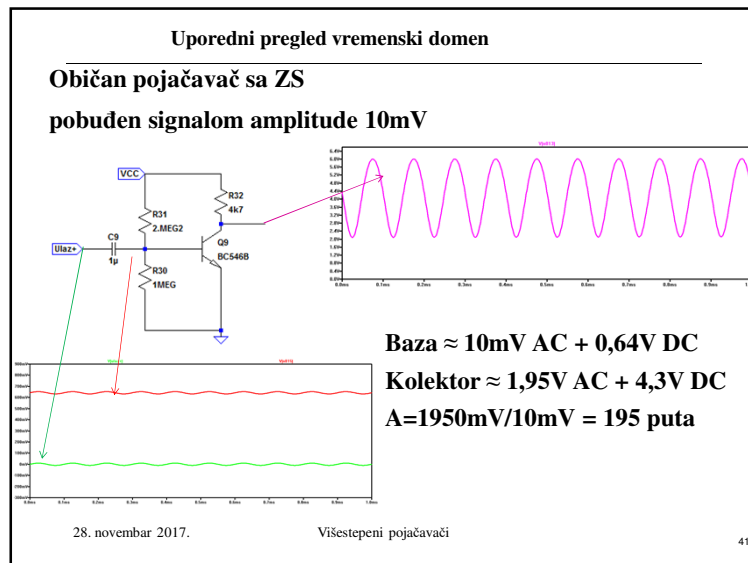
Za $V_{ud} = (I_o / A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = I_o, I_{D2} = 0$
 Za $V_{ud} = -(I_o / A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = 0, I_{D2} = I_o$

$$\Delta V_u = 2(I_o / A)^{1/2} \sim 0.5V$$


28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači $\Delta V_u = 2(I_o / A)^{1/2} \sim 0.5V$ 6

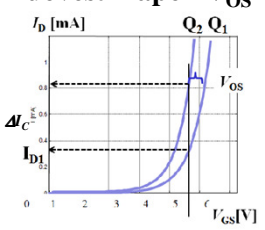
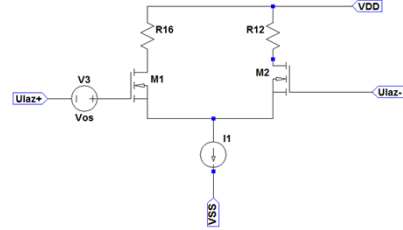
Diferencijalni i višestepeni pojačavači





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

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

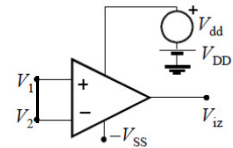
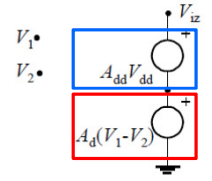
Manji je kod MOS nego kod bipolarnih

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 45

Diferencijalni pojačavač

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

Koliko promene napona napajanja utiču na odziv?

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

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

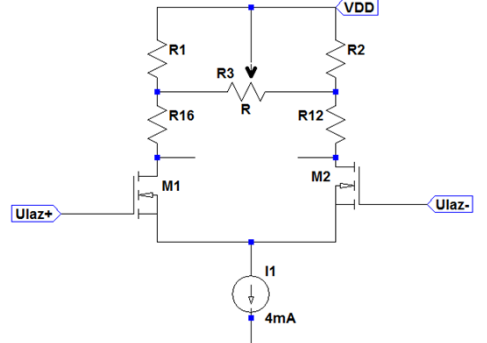
$$= A_d[(V_1 - V_2) + \frac{1}{PSRR_{dd}}V_{dd}]$$

$$PSRR = A_d / A_{dd}$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 47

Naponska razdešenost - ofset

Kompensacija naponskog ofseta




28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 46

Faktor potiskivanja napona napajanja

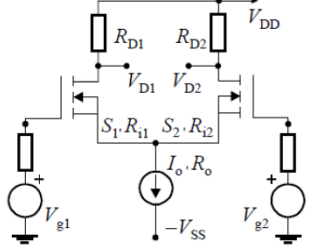
Faktor potiskivanja napona napajanja

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

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 dregnju.



28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 48

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Faktor potiskivanja napona napajanja

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

Gde je ovde ulaz? Izlaz?

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 49

Frekvencijska karakteristika

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

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 51

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 ($R_S || C_S$)

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

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

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 50

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 52

Višestepeni pojačavači

53

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

55

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

28. novembar 2017.

Višestepeni pojačavači

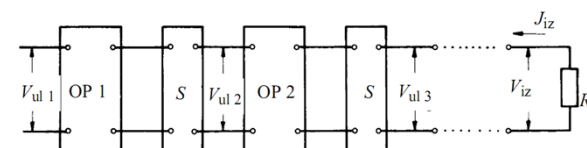
54

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

56

Princip povezivanja višestepnih 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

28. novembar 2017. 57

Kako se realizuju višestepeni pojačavači?

Kako razdvojiti DC a ne oslabiti AC? 🤔

Šta čini kolo za spregu "S"?

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

Princip povezivanja višestepnih 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?

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

Kako se realizuju višestepeni pojačavači

Vrste spregu:

- Kapacitivna
- Induktivna
- Transformatorska
- Direktna

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači

Osobine višestepenih pojačavača

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

Tada za naizmenične signale važi:

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 61

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!

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 63

Osobine višestepenih pojačavača

Pojačanje

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

Pojačanje u dB?

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 62

Osobine višestepenih pojačavača

Realni:

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

Za naponski:

$$A_m = \frac{v_{im}}{v_{um}} = A_{0m} \frac{R_{u(m+1)}}{R_{u(m+1)} + R_{im}}$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 64

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

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

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 65

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

Ukupno pojačanje pri VF

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 67

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

Ukupno pojačanje

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 66

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF, opterećen sa R_p i pobuden 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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 68

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF
gornja granična frekvencija definisana je sa

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

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

Ukupno **pojačanje raste** sa k-tim stepenom!
Ukupni **propusni opseg se sužava - smanjuje!**
Ukupni propusni opseg manji je od najužeg propusnog opsega pojedinačnog pojačavača

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 69

Realni: Osobine višestepenih pojačavača

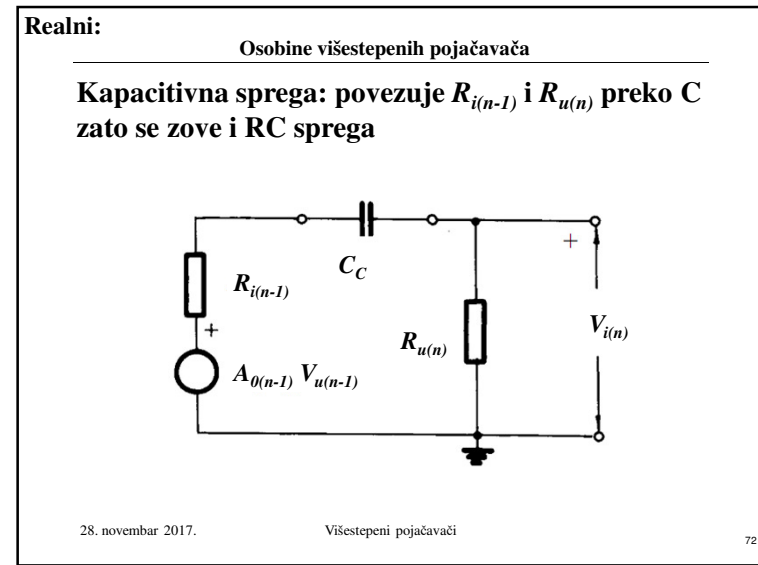
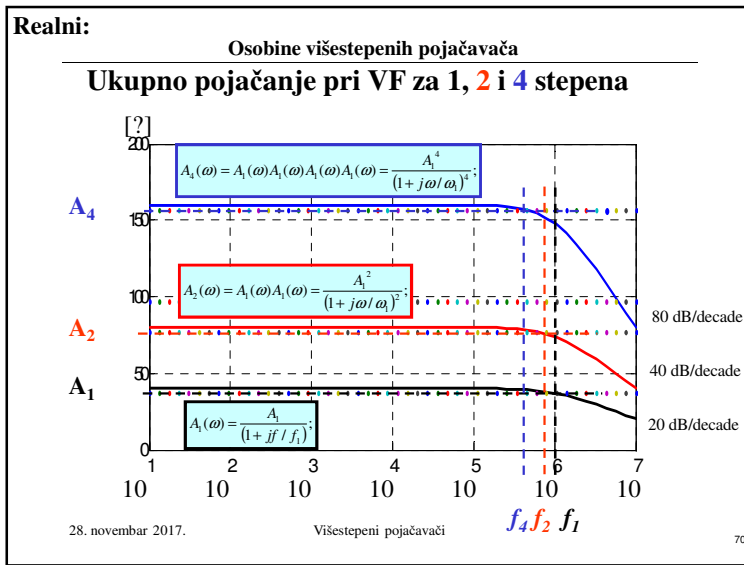
Pojedini pojačavački stepeni mogu biti upotrebljeni za prilagodjenje (naponsko ili strujno) sa generatorom i/ili potrošačem između kojih treba da se nadje osnovni pojačavač čija je glavna namena pojačanje napona.

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 71



Realni: RC sprega

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 73

Realni: RC sprega

$$\omega_n = \frac{1}{C_C (R_{u1} + R_{u2})}$$

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

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

Doprinos kondenzatora za spregu odgovara doprinosu filtra propusnika visokih frekvencija.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 75

Realni: RC sprega Za one koji žele da nauče više

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

$$A_n = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = A_{o1} \frac{R_{u2}}{R_{u1} + j \frac{1}{j\omega C_C} + R_{u2}}$$

$$A_n = A_{o1} \frac{j\omega C_C R_{u2}}{1 + j\omega C_C (R_{u1} + R_{u2})}$$

$$A_n = A_{o1} \frac{R_{u2}}{(R_{u1} + R_{u2})} \frac{j\omega C_C (R_{u1} + R_{u2})}{1 + j\omega C_C (R_{u1} + R_{u2})}$$

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 74

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:

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 76

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Realni: Za one koji žele da nauče više

RC sprega

Potrošač priključen za pojačavač preko C_{S2}

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

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 77

Realni: Za one koji žele da nauče više

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 unilaterarno.- 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.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 79

Realni: Za one koji žele da nauče više

RC sprega

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

Ima tri pola, dominantni uz C_S (C_E)

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

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

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

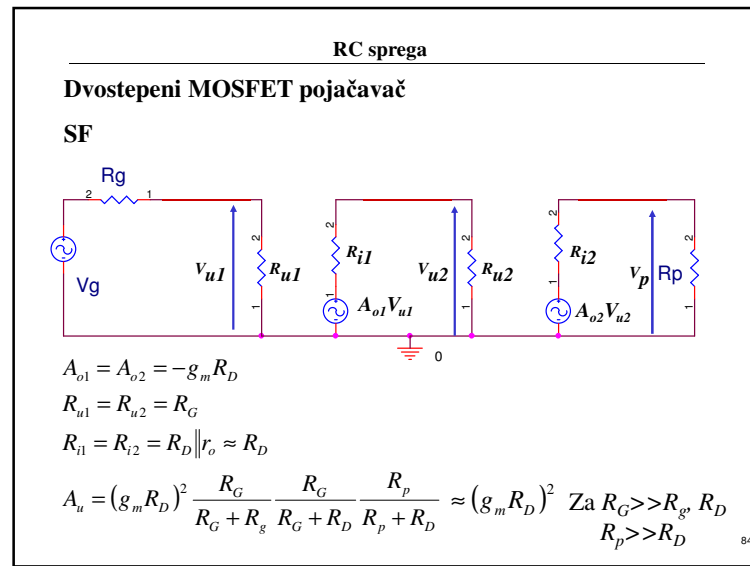
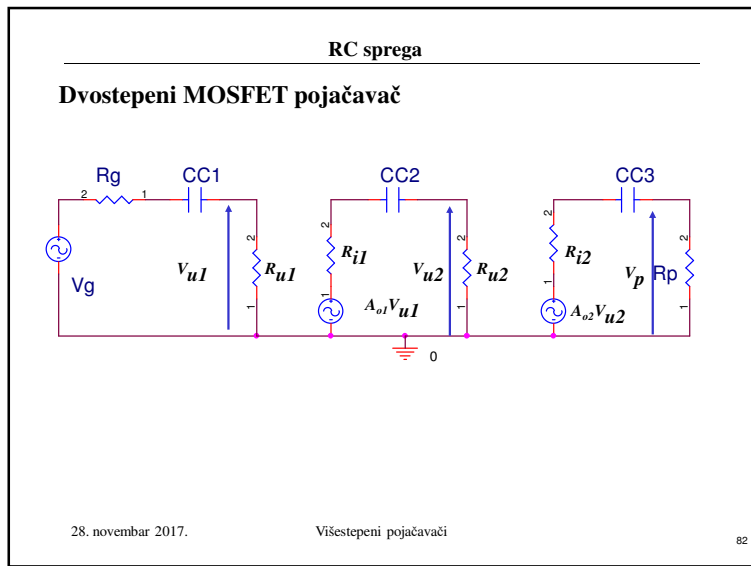
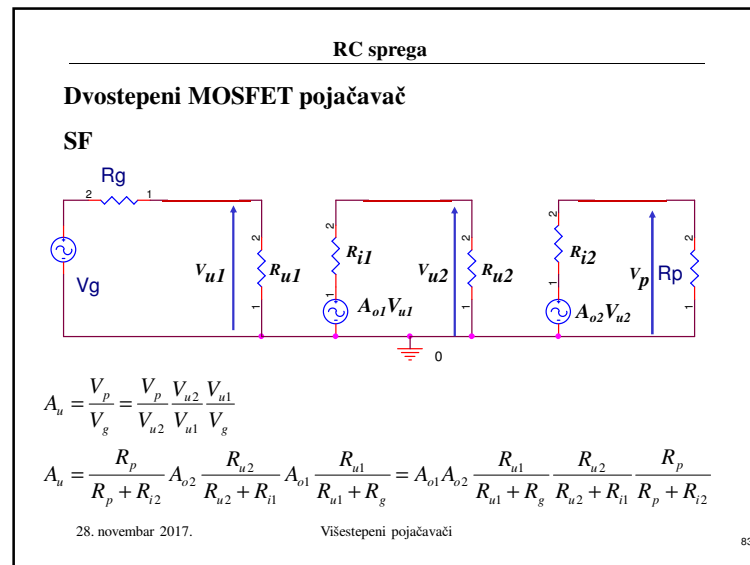
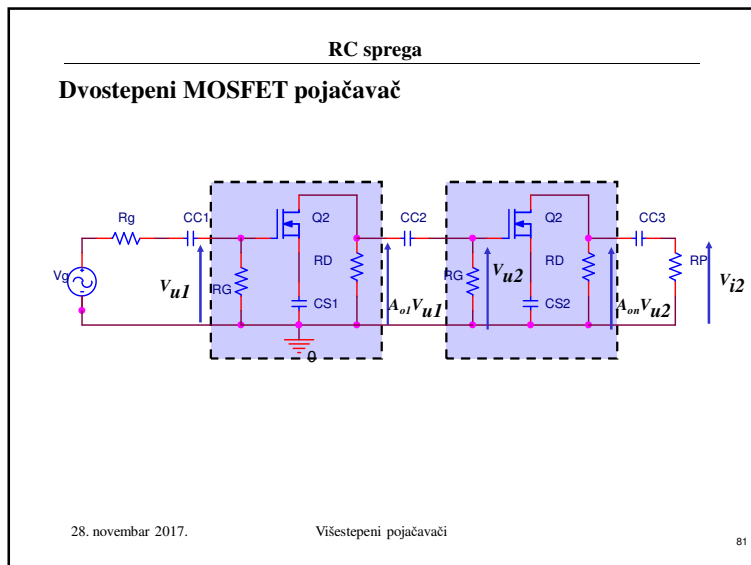
28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 78

RC sprega

Primer:

Dvostepeni MOSFET pojačavač

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 80



RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 85

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

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

$$C_{C1} = C_{C2} = C_{C3} = C_C$$

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

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_G}{1 + j\omega C_{C1} (R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_G}{1 + j\omega C_{C2} (R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3} (R_p + R_D)}$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 87

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_{u1}}{1 + j\omega C_{C1} (R_{u1} + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_{u2}}{1 + j\omega C_{C2} (R_{u2} + R_{i1})} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3} (R_p + R_{i2})}$$

$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_G}{1 + j\omega C_{C1} (R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_G}{1 + j\omega C_{C2} (R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3} (R_p + R_D)}$$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 86

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.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 88

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF

Tranzistor nije unilateralan usled C_{gd}

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 89

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).

28. novembar 2017. 91

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.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 90

Direktna sprega

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

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

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 92

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

Višestepeni pojačavači

28. novembar 2017. 93

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)

95

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

Višestepeni pojačavači

28. novembar 2017. 94

Direktna sprega

Blok šema operacionog pojačavača

Kolo za kompenzaciju

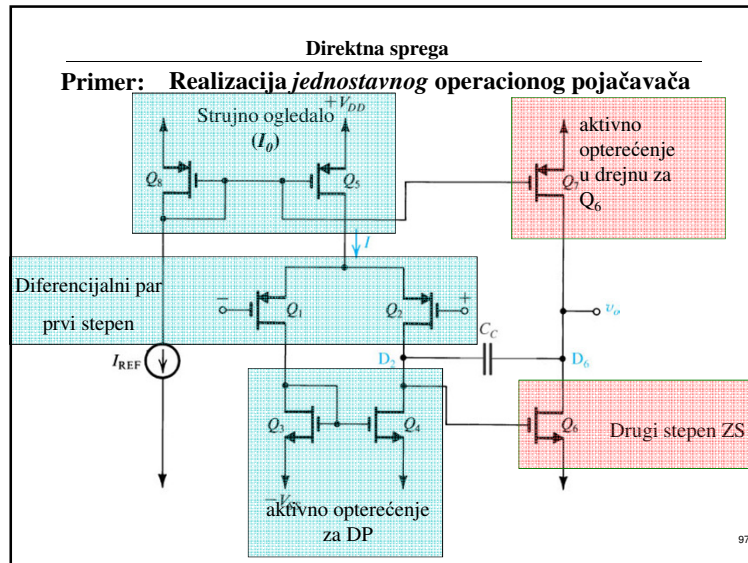
Diferencijalni transkonduktanski pojačavač

Pojačavački stepen

Izlazni bafer

Kolo za polarizaciju

28. novembar 2017. 96



Domaći 8.3: Realizacija sa MOST

• U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa $\mu_n C_{ox} = 160 \mu A/V^2$, $V_{tn} = 0.7V$, $\mu_p C_{ox} = 40 \mu A/V^2$, $V_{tp} = -0.8V$, $V_{An} = -V_{Ap} = -10V$.

Dimenzije tranzistora date su u tabeli

Poznato je $I_{REF} = 90 \mu A$, $V_{DD} = V_{SS} = 2.5V$.

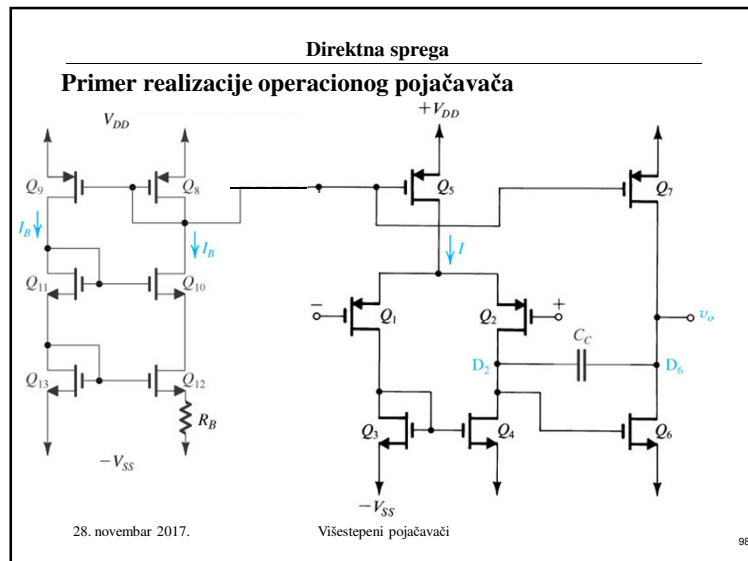
Za one koji žele da nauče više

Dopuniti 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)								

100



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 pobudenog 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

28. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači

100

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Ispitna pitanja?

1. Varijante realizacije diferencijalnih pojačavača (ulazno izlazni priključci, polarizacija i dinamičko opterećenje)
2. Diferencijalno i pojačanje srednje vrednosti ulazni signala diferencijalnih pojačavača (MOS ili BJT).
3. Parametri diferencijalnih pojačavača (CMRR, naponski ofset, PSRR, uzroci efekti i korekcija)
4. Naponsko pojačanje m-tog pojačavača u kaskadnoj vezi.
5. Načini realizacije kola za spregu pojačavača.
6. Frekvencijske karakteristike dvostepenog pojačavača sa zajedničkim sorsom povezanih preko kondenzatora za spregu.

28. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 101

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 $R_g=600\Omega$.

28. novembar 2017. Jednostepeni MOSFET pojačavači 101

Višestepeni pojačavači

Sledećeg časa

Pojačavači sa negativnom povratnom spregom

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 102

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 $R_g=600\Omega$.

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 102

Statička prenosna karakteristika sa BJT Za one koji žele da nauče više

Strujna

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

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

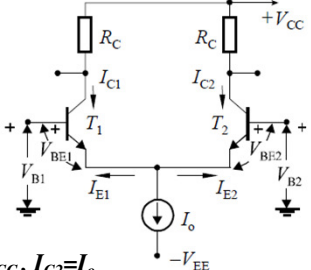
$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$

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

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



28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 109

Statička prenosna karakteristika BJT Za one koji žele da nauče više

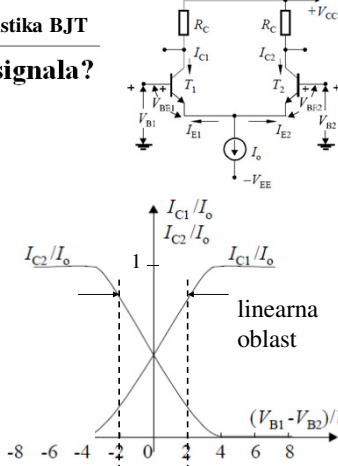
Raspon (dinamika) ulaznog signala?

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

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

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

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

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


28. novembar 2017. Višestepeni pojačavač $\Delta V_u = 4V_T \approx 100mV$ 111

Statička prenosna karakteristika BJT Za one koji žele da nauče više

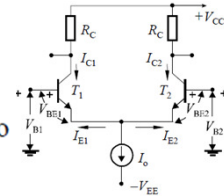
Raspon (dinamika) izlaznog signala

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

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

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

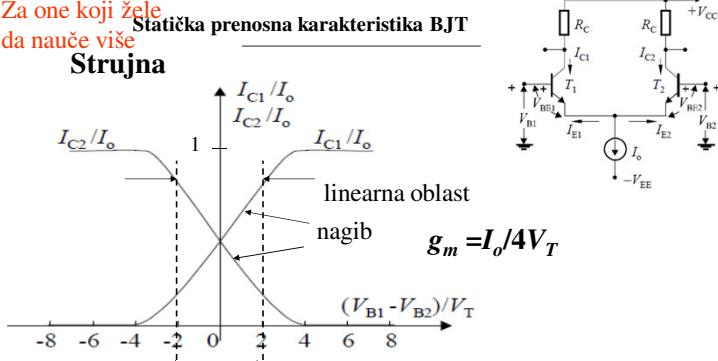
Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa R_C i I_o .



28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 110

Statička prenosna karakteristika BJT Za one koji žele da nauče više

Strujna



$\Delta V_u = 4V_T \approx 100mV$ **Pojačanje direktno zavisi od struje I_o**
Veće I_o , veće pojačanje

$g_m = I_o / 4V_T$

28. novembar 2017. Višestepeni pojačavači 112

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Za one koji žele da nauče više

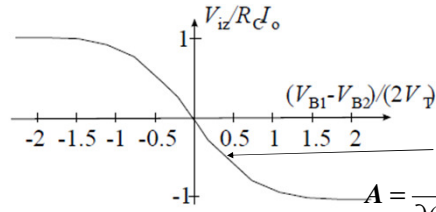
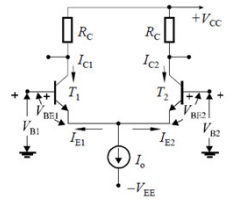
Statička prenosna karakteristika BJT

Naponska

$$V_{iz} = V_{C1} - V_{C2}$$

$$= (V_{CC} - R_C I_{C1}) - (V_{CC} - R_C I_{C2})$$

$$= R_C (I_{C2} - I_{C1})$$



$$A = \frac{\partial V_{iz}}{\partial (V_{B1} - V_{B2})} \Big|_{V_{B1} = V_{B2}}$$

$$A = 2R_C \left(\frac{I_o}{4V_T} \right) = -2R_C \cdot g_{md}$$

28. novbar 2017.

Višestepeni pojačavači

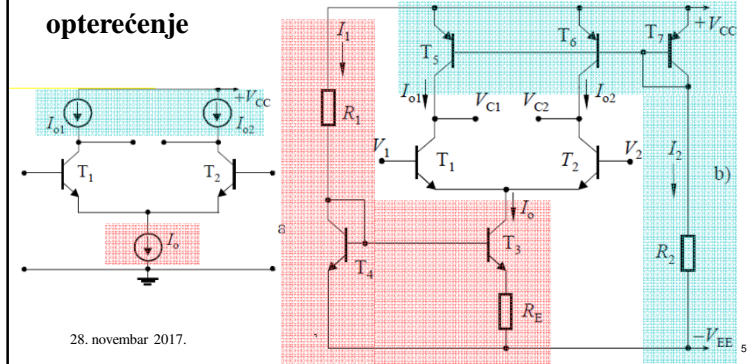
113

Diferencijalni pojačavači

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje zahteva veće R_C (R_D)

Rešenje – strujni generatori kao dinamičko opterećenje

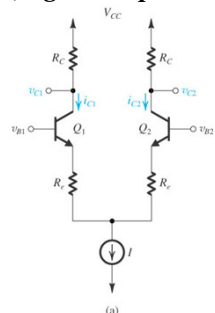


28. novbar 2017.

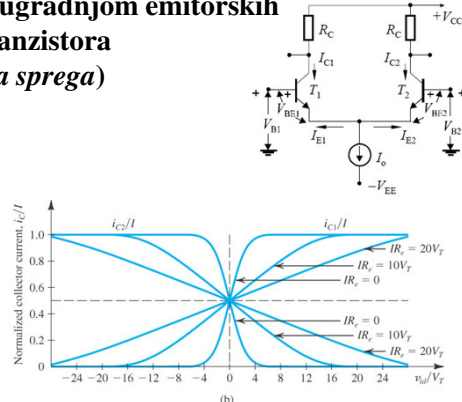
Statička prenosna karakteristika BJT

Za one koji žele da nauče više

Povećanje dinamičkog opsega ulaznog napona postiže se ugradnjom emitorskih otpornika u oba tranzistora (negativna povratna sprega)



28. novbar 2017.



Višestepeni pojačavači

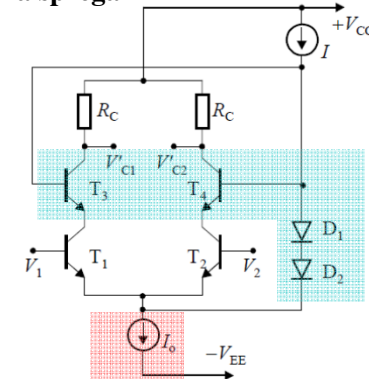
114

Poboljšanje performansi

Za one koji žele da nauče više

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega



28. novbar 2017.

Višestepeni pojačavači

116

Poboljšanje performansi

Za one koji žele da nauče više

Veće pojačanje – tranzistori sa većim β
Veća ulazna otpornost
Rešenje – Darlingtonov par

Višestepeni pojačavači

28. novembar 2017. 117

Direktna sprega

Za one koji žele da nauče više

Darlingtonova sprega

ZC-ZC veza

Velika ulazna, mala izlazna otpornost

I obezbeđuje da Q_1 radi u oblasti sa velikim β

Višestepeni pojačavači

28. novembar 2017. 119

Direktna sprega

Za one koji žele da nauče više

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

Darlingtonova sprega

$\beta_e = \beta_1 \beta_2$

NPN PNP

Višestepeni pojačavači

28. novembar 2017. 118

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

Kompenzacija strujnog ofseta

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

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

28. novembar 2017. Višest 121