

Osnovi elektronike

Predispitne obaveze:

U JANUARU OSTALO

Redovno pohađanje nastave (predavanja+vežbe)	10%	10%
Odbranjene laboratorijske vežbe	10%	10%
Kolokvijum I (26.11.2016.)	50%	20%
Kolokvijum II (21.01.2017.)	50%	20%
	-----	-----
	120%	60%



Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

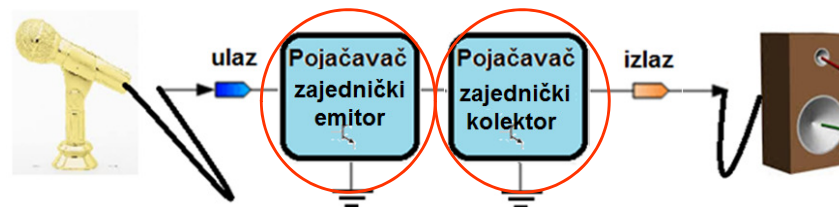
01. decembar 2016.

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

1

1

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?

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

2

Diferencijalni pojačavači

3

Sadržaj

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

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

4

Zašto diferencijalni ?

Naziv „diferencijalni“ šta znači?



Pojačavaju razliku signala.

Zašto razliku, a ne zbir? - diferencijalni



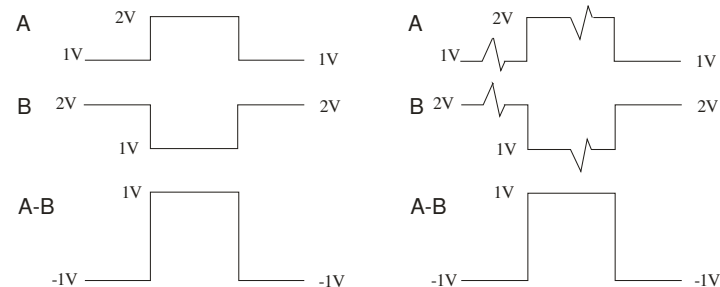
- poništavanje smetnji

Uz to:

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

Zašto diferencijalni ?

Poništavanje smetnji:



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?



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?

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.

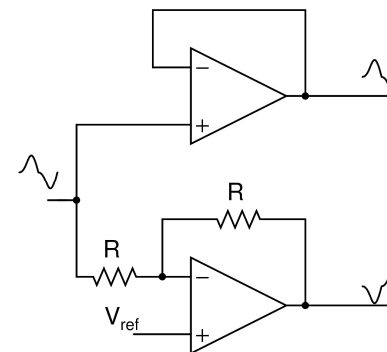
Relativno velika ulazna, koja može da se poveća sa R_S ali i izlazna otpornost.

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza.

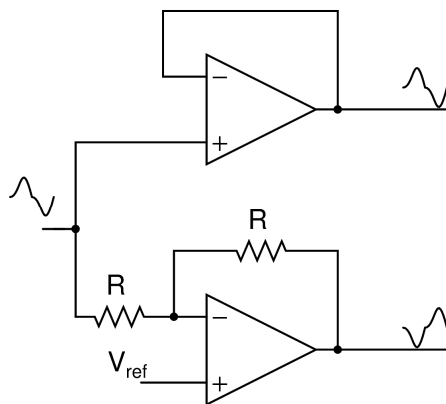
Kako napraviti diferencijalni signal?



Kombinovanjem invertorskog i neinvertorskog pojačavača



Kako dobiti diferencijalni signal?



Dva sa ZS (ZE).



Biramo najbolje rešenje:

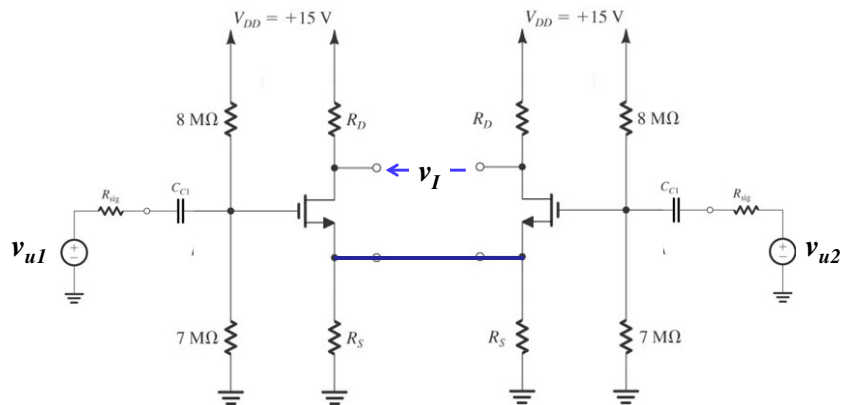
Zbog stabilnosti – otpornost u sorsu (emitoru).

Zbog pojačanja što veća dinamička otpornost u dregnju/kolektoru.

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

Princip rada

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



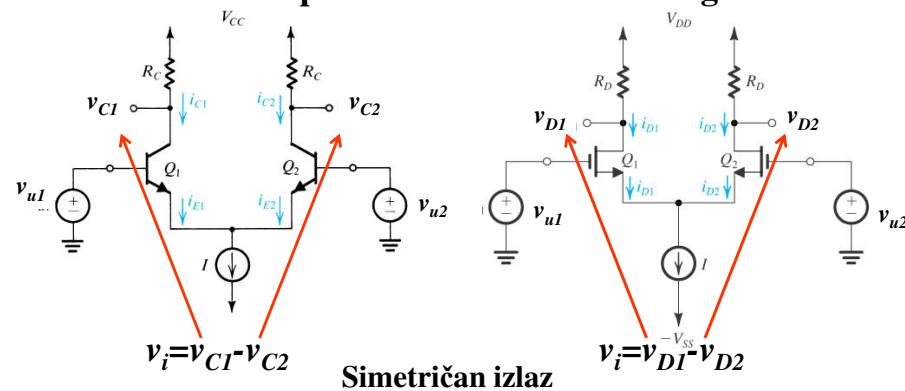
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

13

Princip rada

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



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

14

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.

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

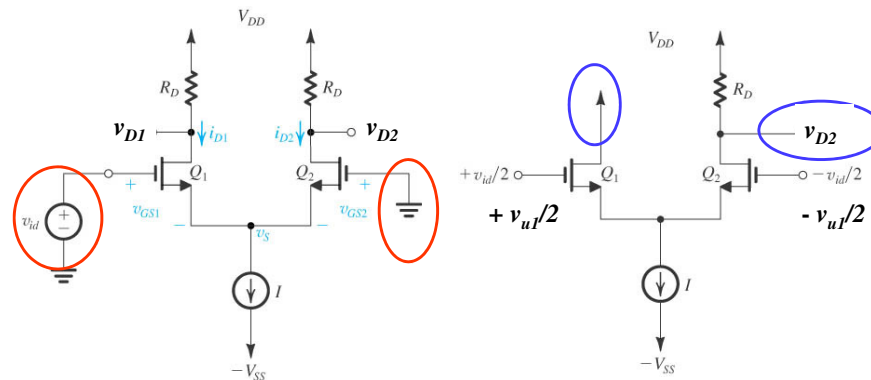
15

Princip rada

Moguće kombinacije:

Asimetrični ulaz

Asimetrični izlaz



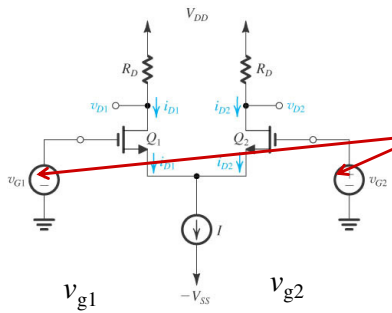
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

16

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:



Dva simetrična ulaza
Dva simetrična izlaza
Ulazni signali:

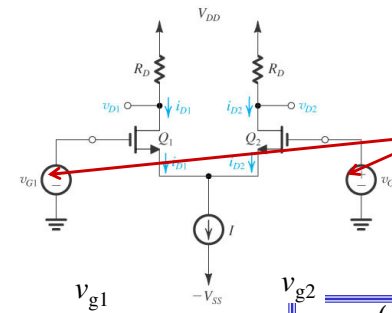
Korisni: signal razlike (diferencijalni)

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

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

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:



Dva simetrična ulaza
Dva simetrična izlaza
Ulazni signali:

Korisni: signal razlike (diferencijalni)

Neželjeni: zajednički napon na oba ulaza - signal srednje vrednosti

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

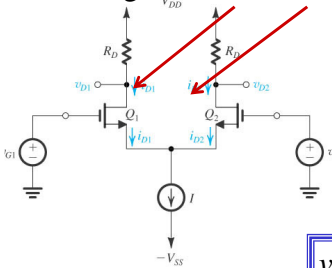
$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} \equiv v_{UCM} \equiv v_{UC}$$

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

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

Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2



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

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

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

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

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

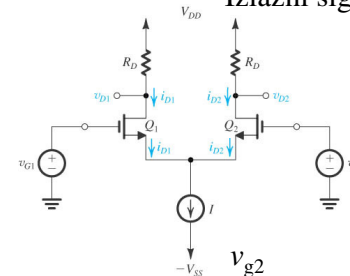
$$v_{IS} = V_D + \frac{(v_{d1} + v_{d2})}{2} \equiv v_{ICM} \equiv v_{IC}$$

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

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

Realizacija sa MOST

Izlazni signali na D1 i D2, diferencijalni izlaz



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

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

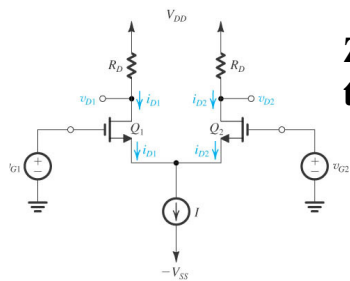
Faktor potiskivanja srednje vrednosti

CMRR (Common Mode Rejection Ratio):

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

Pokazuje koliko puta je pojačanje razlike veće od pojačanja srednje vrednosti

Realizacija sa MOST



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

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

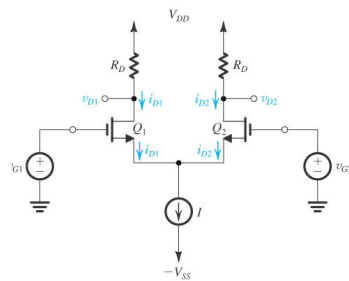
$$\begin{cases} g_m = S \\ r_o = R_i \\ g_m r_o = \mu \end{cases}$$

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

diferencijalno pojačanje jednako pojačanju ZS

Videti šestu nedelju predavanja „Jednostepeni MOSFET pojačavači“ slajd 36

Realizacija sa MOST



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

CMRR veće za veće R_S

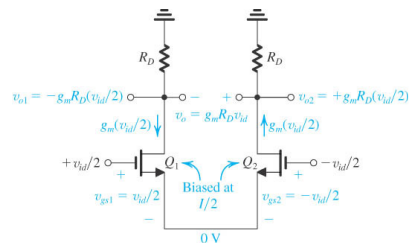
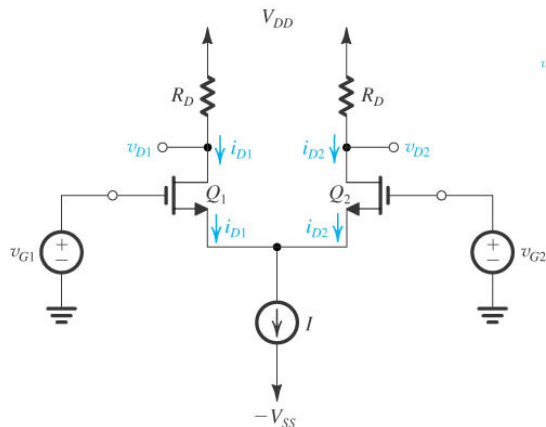
Zato?



izvor konstantne struje umesto R_S .

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0 .



Za simetrični izlaz

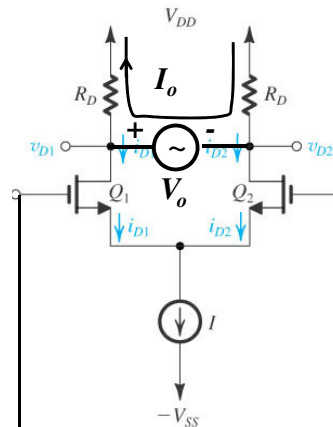
$$A_c = 0.$$

$$A_d = -g_m R_D.$$

$$\rho \rightarrow \infty$$

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0 .



Izlazna otpornost

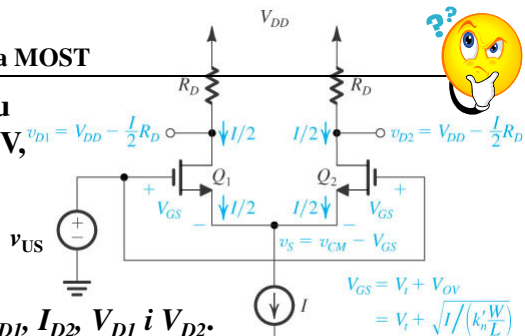
$$R_i = \frac{V_o}{I_o} = R_{D1} + R_{D2} = 2R_D$$

Dva puta veća nego kod pojačavača sa ZS!!!

Domaći 8.1: Realizacija sa MOST

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa $V_t=0.5V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$, $\lambda=0$.

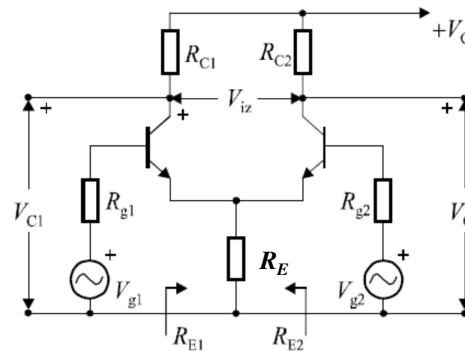
Poznato je $I=0.4mA$, $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$ i $R_D=2.5k\Omega$.



- 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 $CMMR$. ($g_m=1.25mA/V$, $A_d=-3.125V/V$, $A_c=0$, $CMRR \rightarrow \infty$)

Realizacija sa BJT Primer BJT pojačavač:

Za one koji žele da nauče više



Za one koji žele da nauče više

Realizacija sa BJT

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

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

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

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

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

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

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

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

Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

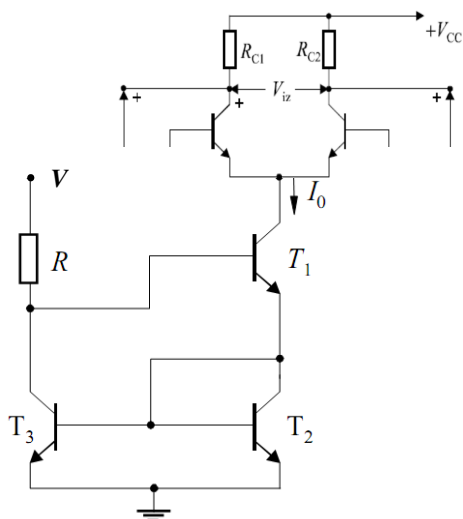
$$\rho = \frac{2R_E}{h_{11E}} (1 + h_{21E} + \frac{h_{11E}}{2R_E})$$

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

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

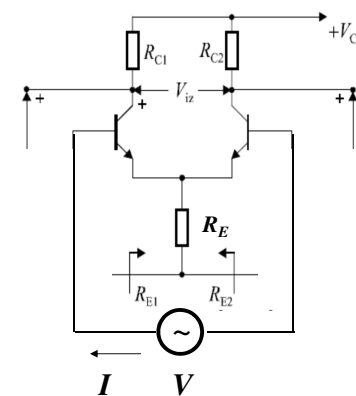
Wilsonov strujni izvor - veće R_E .



Ulazna otpornost

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

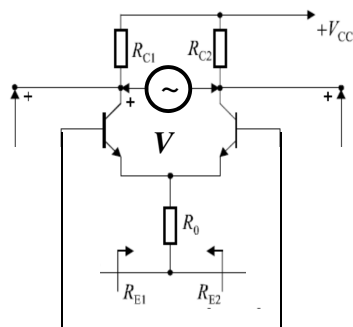
2x veća nego kod ZE



Izlazna otpornost

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

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



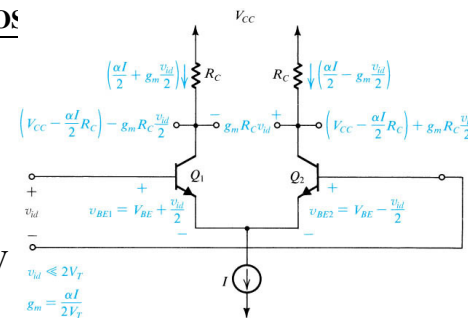
Domaći 8.2 :

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

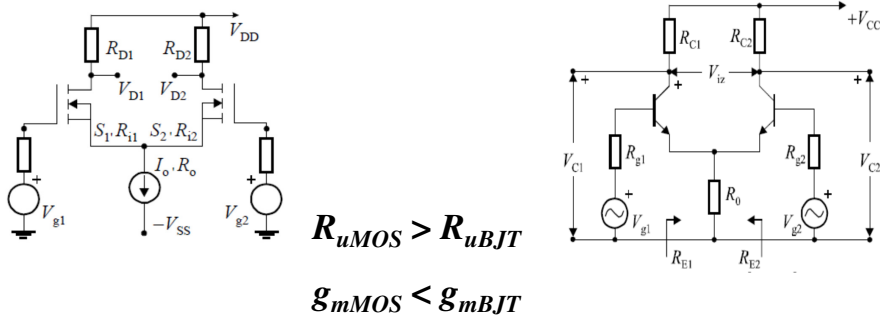
- a) i_{C1} , i_{C2} , ($i_{C1}=0.5+0.1\sin(\omega t)$ mA, $i_{C2}=0.5-0.1\sin(\omega t)$ mA)
- b) v_{C1} , v_{C2} . ($v_{C1}=10-1\sin(\omega t)$ V, $v_{C2}=10+1\sin(\omega t)$ V)
- c) A_d . ($A_d=200V/V$)



Za one koji žele
da nauče više

Realizacija sa BJT

MOS v.s. BJT



MOST teže se uparuje od BJT

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

Za one koji žele
da nauče više

Statička prenosna karakteristika sa MOST

Strujna

$I_{D1} + I_{D2} = I_o$

V_{G1} menjamo

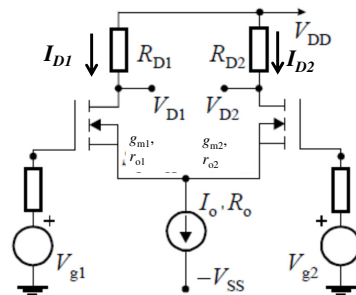
V_{G1} malo, T1 zakočen.

Za $V_{G2} > V_t$, $I_{D2} = I_o$,

$V_{DS1max} = V_{DD}$

V_{G1} raste, T1 provede:

$I_{D1} \uparrow, I_{D2} \downarrow, V_{DS1} \downarrow, V_{DS2} \uparrow$



$I_{D1max} = I_o$ za

$V_{GS1} - V_t = (I_o/A)^{1/2}$

$V_{DS1min} = V_{DD} - I_o R_D$

$V_{DS2max} = V_{DD}$

Za one koji žele
da nauče više

Statička prenosna karakteristika sa MOST

Strujna

$I_{D1} + I_{D2} = I_o$

Sličnom analizom

za V_{G2} malo, T2 zakočen.

$I_{D1} = I_o, V_{DS2max} = V_{DD}$

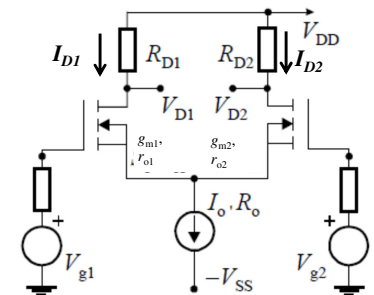
V_{G2} raste, T2 provede

$I_{D2} \uparrow, I_{D1} \downarrow, V_{DS2} \downarrow, V_{DS1} \uparrow$

$I_{D2max} = I_o$ za $V_{UD} = -(I_o/A)^{1/2}$

$V_{DS2min} = V_{DD} - I_o R_D$

$V_{DS1max} = V_{DD}$



Za one koji žele
da nauče više

Statička prenosna karakteristika MOST

Raspon (dinamika) izlaznog signala

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

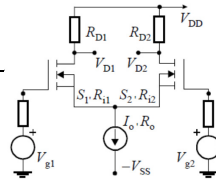
$$V_{izmax} = I_o R_D$$

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

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

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

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



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

37

Za one koji žele
da nauče više

Statička prenosna karakteristika MOST

Raspon (dinamika) ulaznog signala?

$$V_{ud} = V_{G1} - V_{G2} = \sqrt{I_{D1}/A} - \sqrt{I_{D2}/A}$$

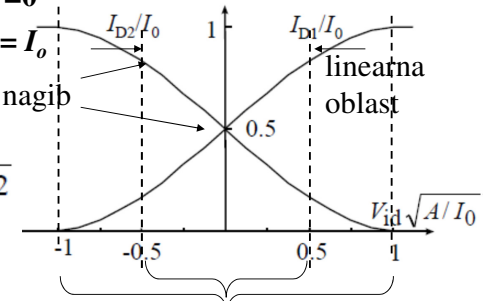
$$I_{D1,2} = \frac{I_o}{2} \left[1 \pm \sqrt{\frac{2A}{I_o} V_{ud}^2 - \frac{A^2}{I_o^2} V_{ud}^4} \right]$$

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

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

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

$$(g_m)_d = \left. \frac{dI_{D1}}{dV_{ud}} \right|_{V_{ud}=0} = \sqrt{A \cdot I_o} / 2$$



01. decembar 2016.

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

8

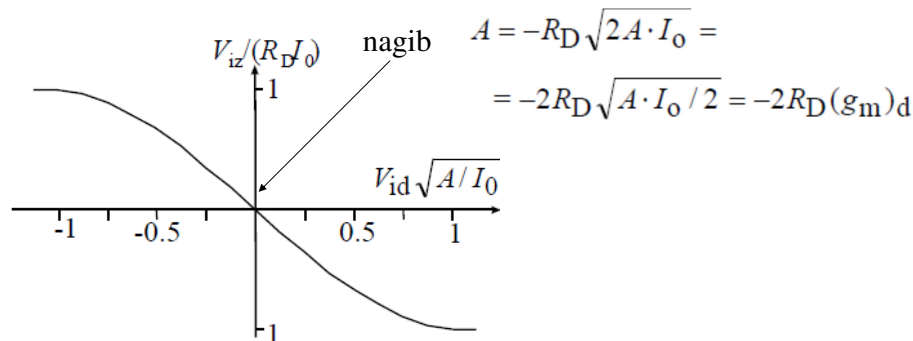
Za one koji žele
da nauče više

Statička prenosna karakteristika MOST

Naponska

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

$$= -I_o R_D \sqrt{2A V_{ud}^2 / I_o - A^2 V_{ud}^4 / I_o^2}$$



01. decembar 2016.

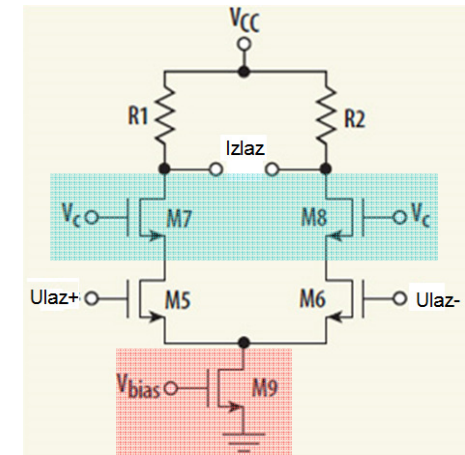
Višestepeni pojačavači

39

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega



01. decembar 2016.

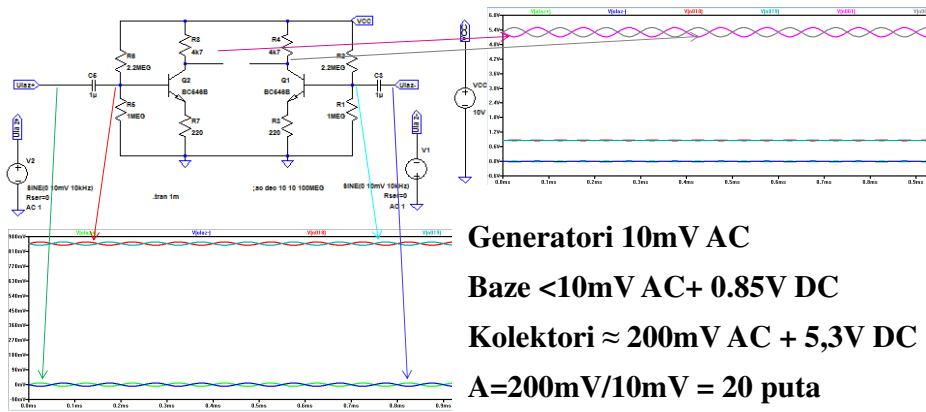
Višestepeni pojačavači

40

Za one koji žele
da nauče više

Uporedni pregled vremenski domen

Dva nezavisna pojačavača sa ZE i RE
pobuđena signalima u protivfazi, amplitude 10mV



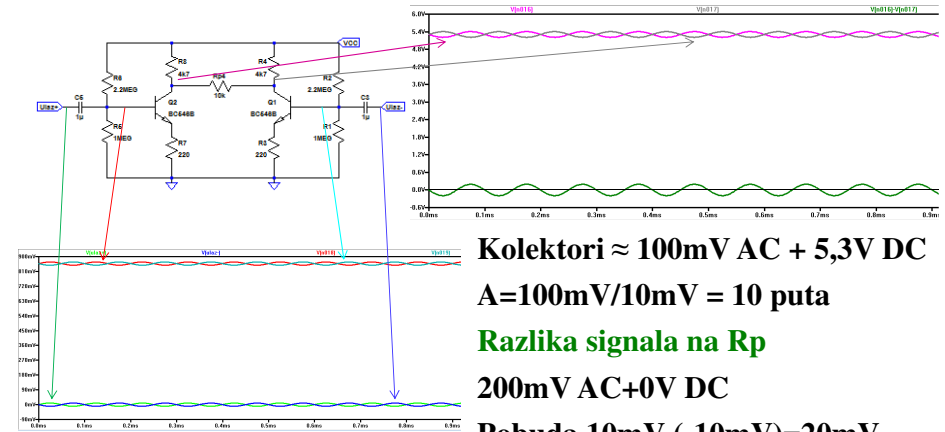
Generatori 10mV AC
Baze <10mV AC+ 0.85V DC
Kolektori ≈ 200mV AC + 5,3V DC
 $A=200mV/10mV = 20$ puta

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Uporedni pregled vremenski domen

Dva pojačavača sa ZE i RE sa $R_p=10k$ između kolektora
pobuđena signalima u protivfazi, amplitude 10mV



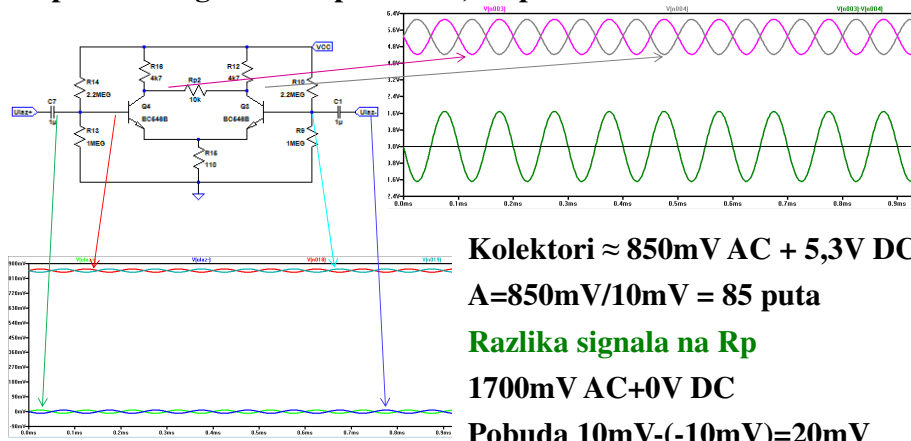
Kolektori ≈ 100mV AC + 5,3V DC
 $A=100mV/10mV = 10$ puta
Razlika signala na R_p
200mV AC+0V DC
Pobuda 10mV-(-10mV)=20mV
 $A_d=200mV/20mV=10$ puta

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Uporedni pregled vremenski domen

Diferencijalni pojačavač sa $R_p = 10k$ između kolektora
pobuđen signalima u protivfazi, amplitude 10mV



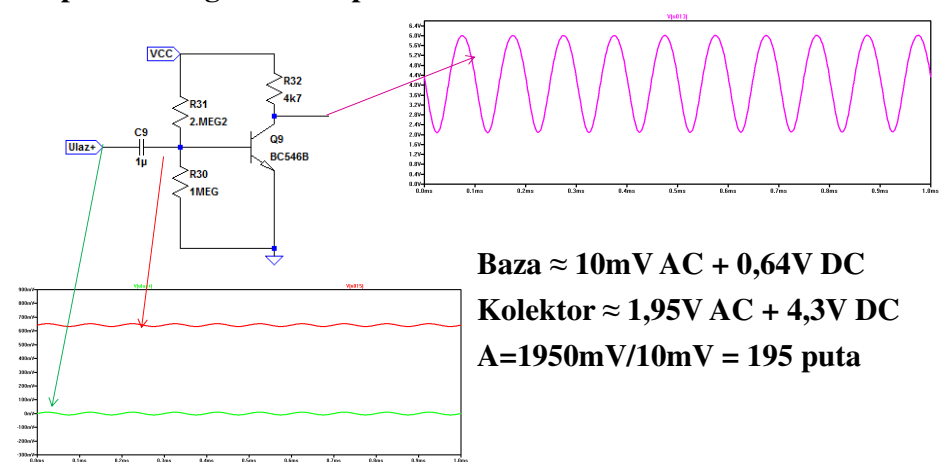
Kolektori ≈ 850mV AC + 5,3V DC
 $A=850mV/10mV = 85$ puta
Razlika signala na R_p
1700mV AC+0V DC
Pobuda 10mV-(-10mV)=20mV
Pojačanje $A_d=85$

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Uporedni pregled vremenski domen

Običan pojačavač sa ZS
pobuđen signalom amplitude 10mV

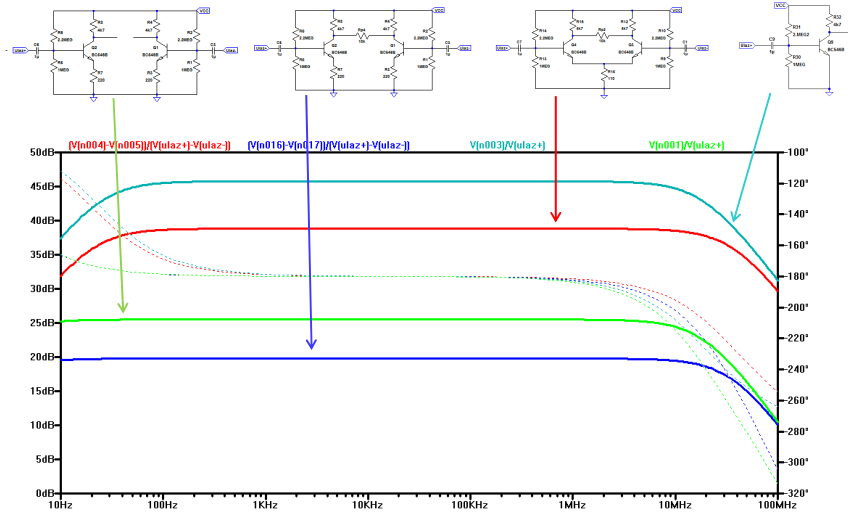


Baza ≈ 10mV AC + 0,64V DC
Kolektor ≈ 1,95V AC + 4,3V DC
 $A=1950mV/10mV = 195$ puta

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Uporedni pregled frekventijske karakteristike



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

45

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*).

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

46

Diferencijalni pojačavači

1. Naponska razdešenost - ofset

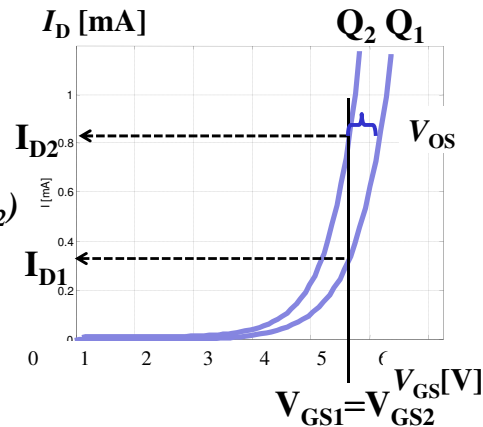
Postoji napon na izlazu i kada je $V_{UD}=0$.

Zašto?



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

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



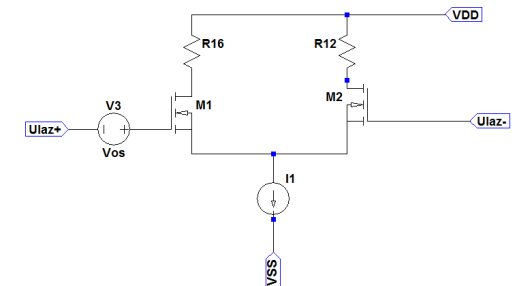
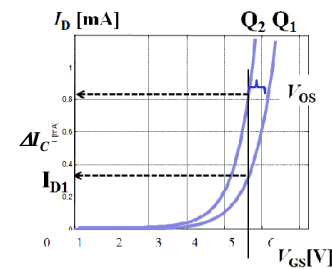
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

47

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*

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

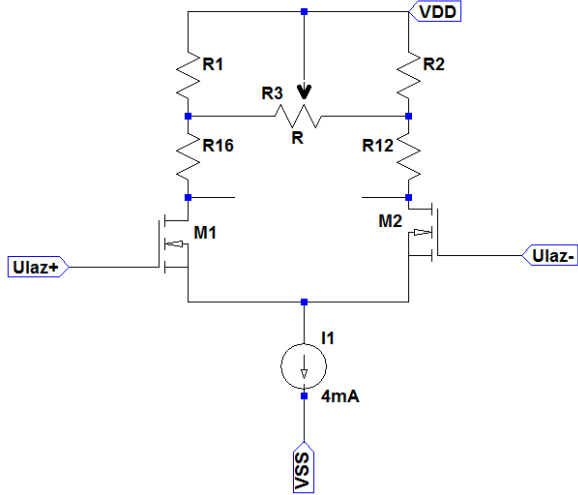
Manji je kod MOS nego kod bipolarnih

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

48

Kompensacija naponskog ofseta



01. decembar 2016.

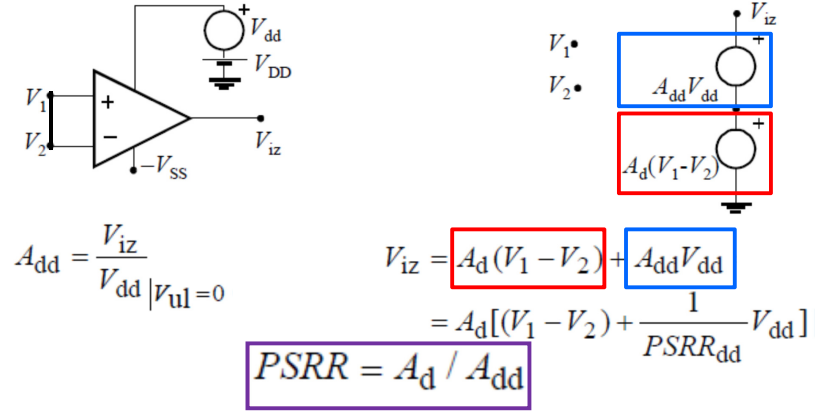
Višestepeni pojačavači

49

Faktor potiskivanja napona napajanja

(Power Supply Rejection Ratio – PSRR)

Koliko promene napona napajanja utiču na odziv?



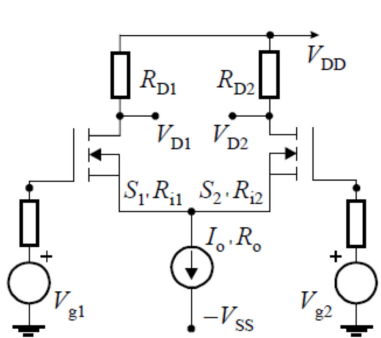
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

50

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.



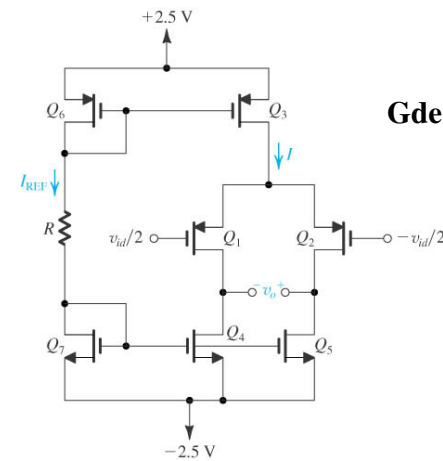
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

51

Faktor potiskivanja napona napajanja

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



Gde je ovde ulaz? Izlaz?



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

52

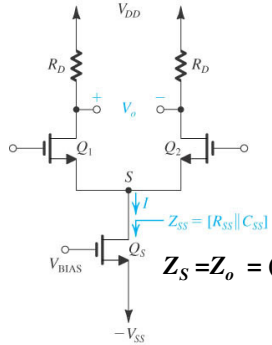
Diferencijalni pojačavač

Frekvencijska karakteristika

Definisana parazitnim kapacitivnostima

Za A_d ista kao kod pojačavača ZE (ZS)

Za A_c treba zameniti R_S sa Z_S ($R_S \parallel C_S$)



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

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

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

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

$$Z_S = Z_o = (R_o \parallel C_o) = (R_S \parallel C_S)$$

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

53

Frekvencijska karakteristika

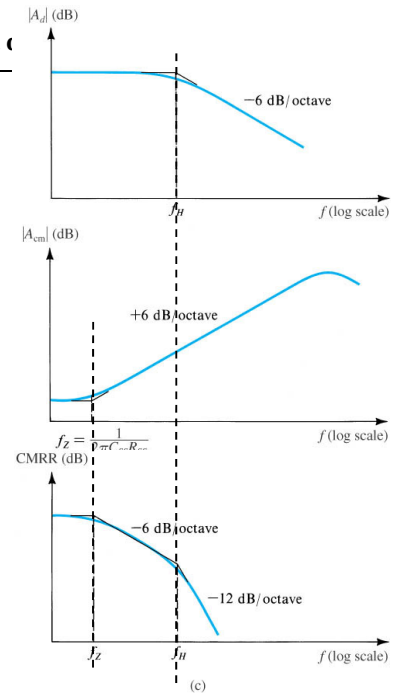
$$A_d = -\frac{g_m R_D}{1 + j(f/f_v)}$$

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

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

01. decembar 2016.




Višest



54

Višestepeni pojačavači

Sadržaj

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

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

55

56

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

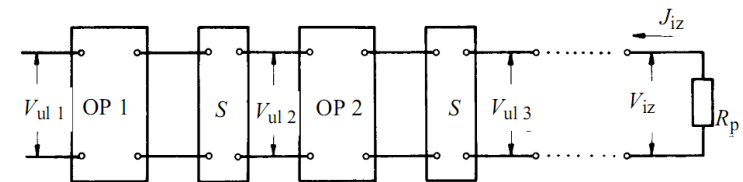
Zašto višestepeni pojačavači?



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.



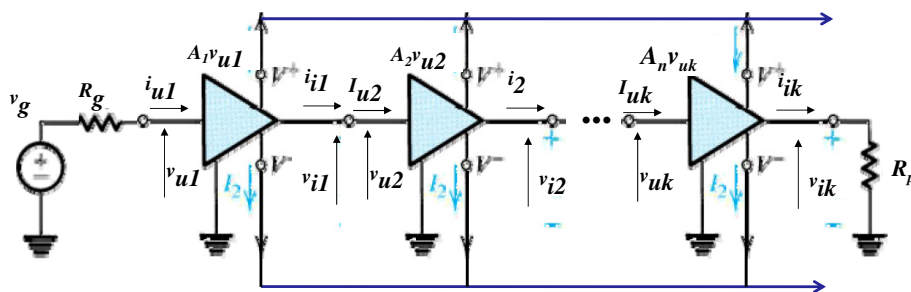
Kaskadna veza pojačavača

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



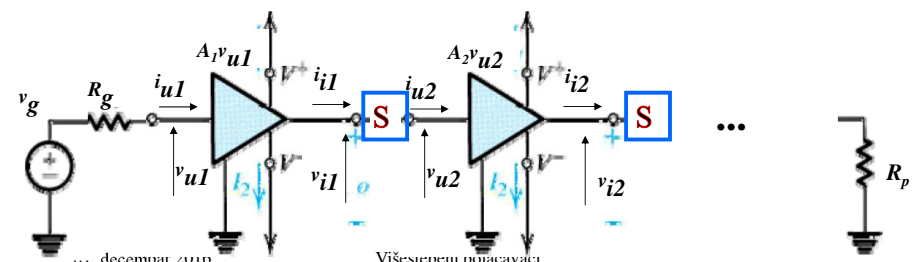
Princip povezivanja višestepenih pojačavača

Idealno: DC radna tačka svakog stepena postavlja se nezavisno za svaki stepen posebno.

Ovo implicira da su pojedini stepeni međusobno razdvojeni za jednosmerne signale (**Međutim ...**).

Mora da postoji sprega za naizmenične signale.

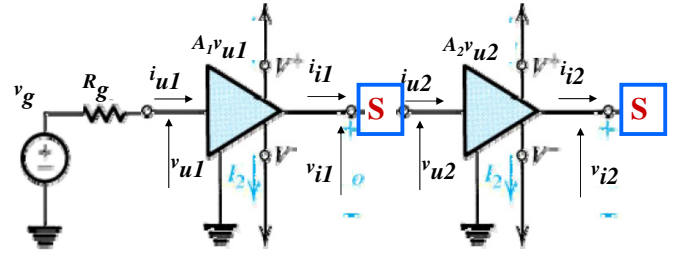
Kolo za spregu?



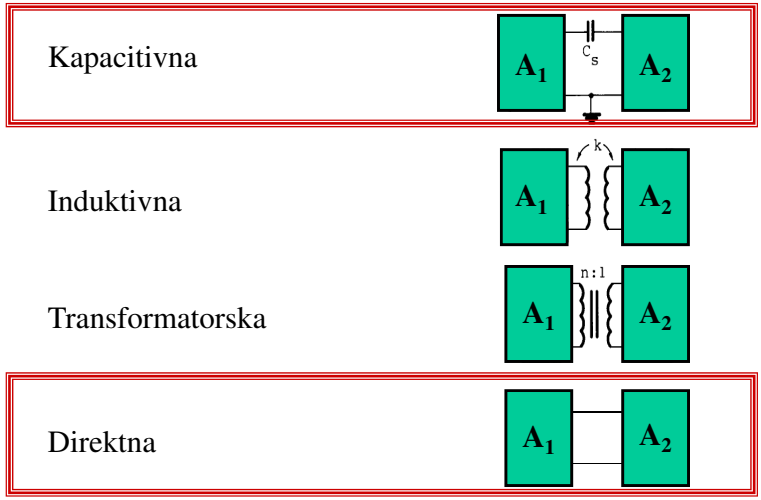


Kako razdvojiti DC a ne oslabiti AC?

Šta čini kolo za spregu "S"?



Vrste spregu:

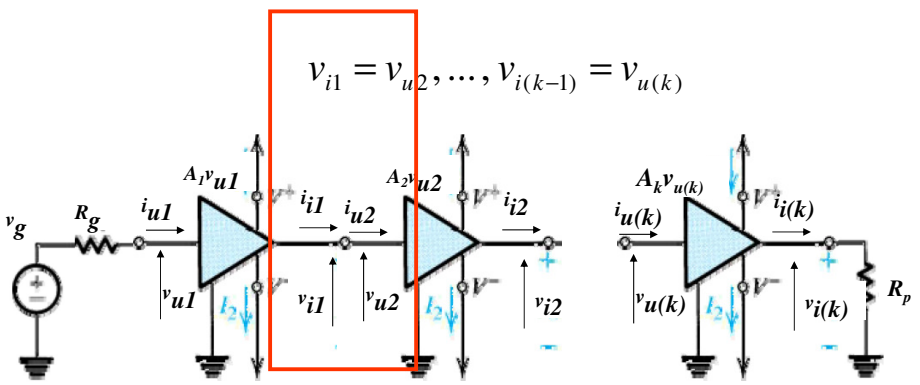


Osobine višestepnih pojačavača

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

Tada za naizmenične signale važi:

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



Osobine višestepnih pojačavača

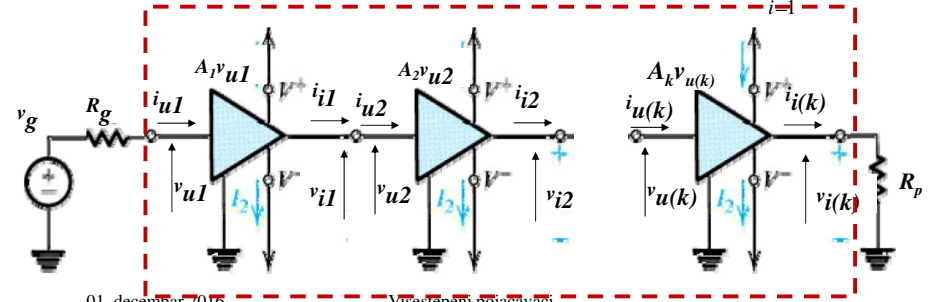
Pojačanje

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

Pojačanje u dB?



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



Realni:

Pojačanje pojedinih stepena nije jednako pojačanju neopterećenih pojačavača!

Svaki prethodni stepen opterećen je ulaznom otpornošću narednog.

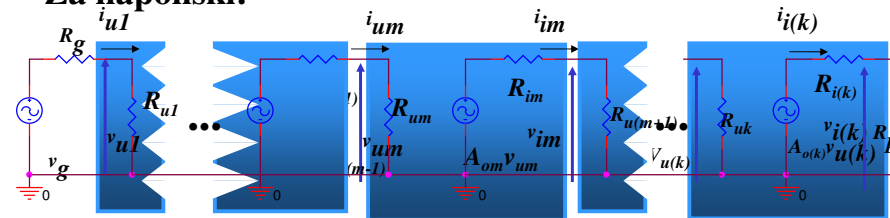
Svaki naredni stepen pobuđuje se preko izlazne otpornosti prethodnog.

ZATO SU VAŽNE ULAZNE/IZLAZNE OTPORNOSTI!

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:



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

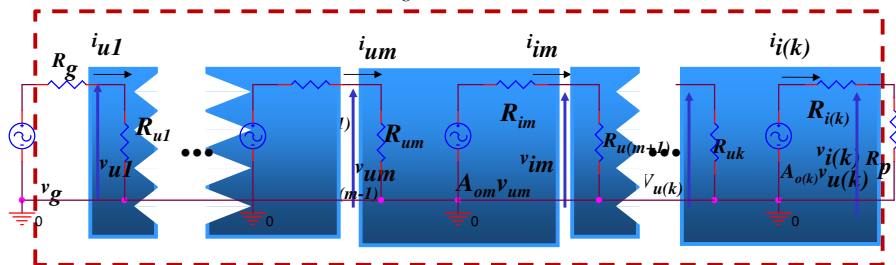
Realni:

Za one koji žele da nauče više

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

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

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



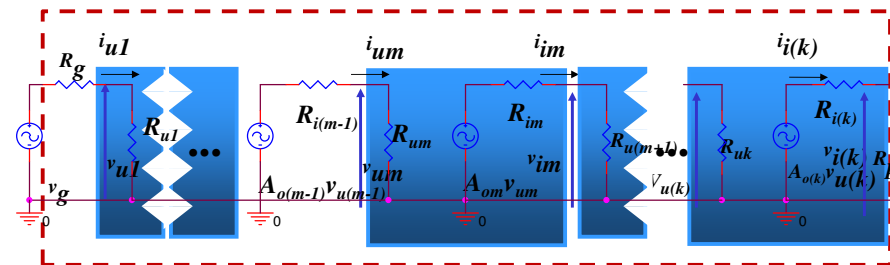
Realni:

Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje

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

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



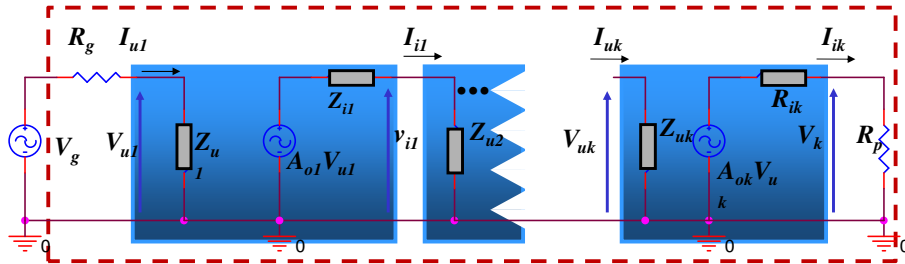
Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele
da nauče više

Ukupno pojačanje pri VF

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



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

69

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF

Neka su svi pojačavački stepeni identični sa
realnim ulaznim i izlaznim impedansama 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

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

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

70

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

01. decembar 2016.

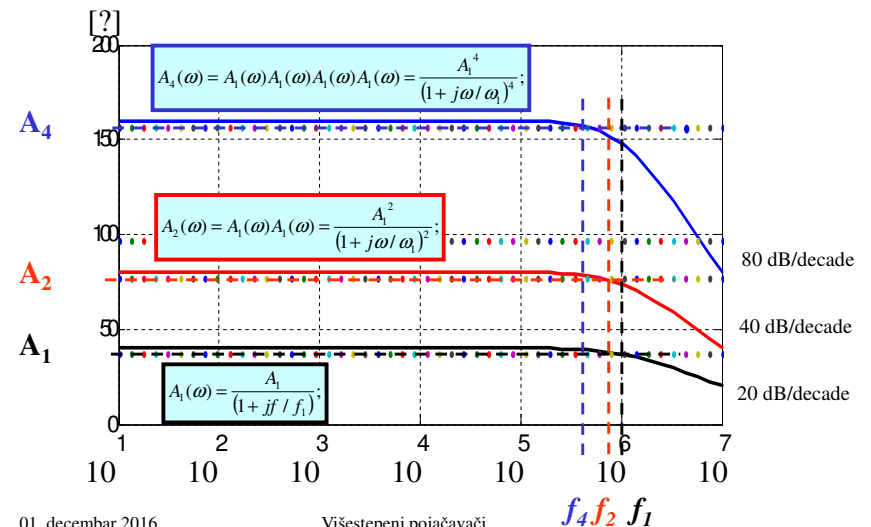
Višestepeni pojačavači

71

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF za 1, 2 i 4 stepena



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

72

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.

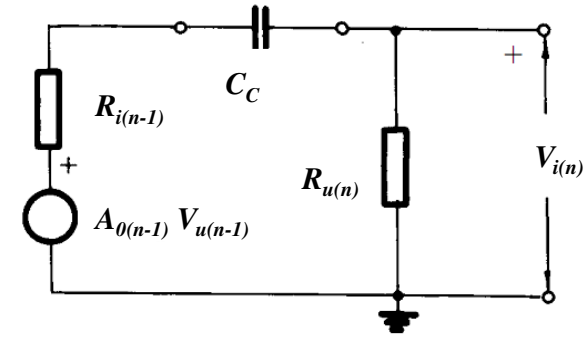
Kolike su vrednosti ulazne/izlazne otpornosti ZB/ZG i ZC/ZD?

Videti petu i šestu nedelju predavanja

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

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



Realni:

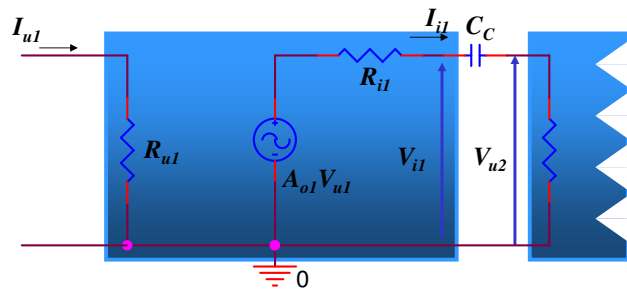
RC sprega

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□

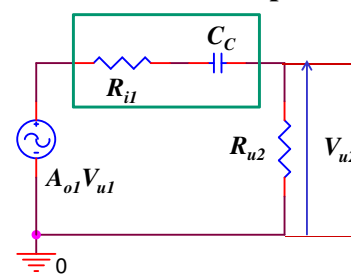


Realni:

RC sprega

Za one koji žele da nauče više

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF



$$A_n = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = A_{o1} \frac{R_{u2}}{R_{i1} + j \frac{1}{j\omega C_c} + R_{u2}}$$

$$A_n = A_{o1} \frac{j\omega C_c R_{u2}}{1 + j\omega C_c (R_{i1} + R_{u2})}$$

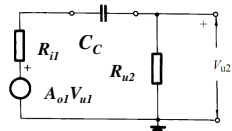
$$A_n = A_{o1} \frac{R_{u2}}{(R_{i1} + R_{u2})} \frac{j\omega C_c (R_{i1} + R_{u2})}{1 + j\omega C_c (R_{i1} + R_{u2})}$$

$$A_n = A_0 \frac{j\omega \tau_c}{1 + j\omega \tau_c}$$

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

Realni:

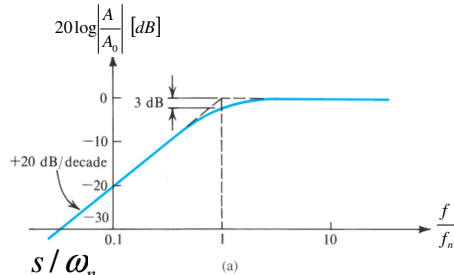
RC sprega



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

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

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



Doprinos kondenzatora za spregu odgovara doprinosu filtra pospusnika visokih frekvencija.

Realni:

RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

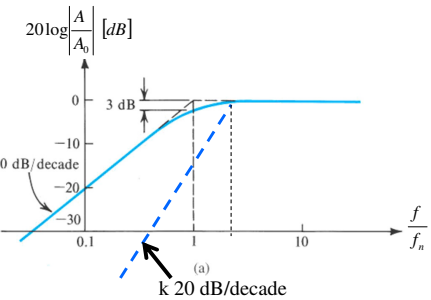
Pretpostavimo da je k pojačavača vezano kaskadno i da su pojačavači identični tako da je:

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

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

Tada će granična frekvencija biti:

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

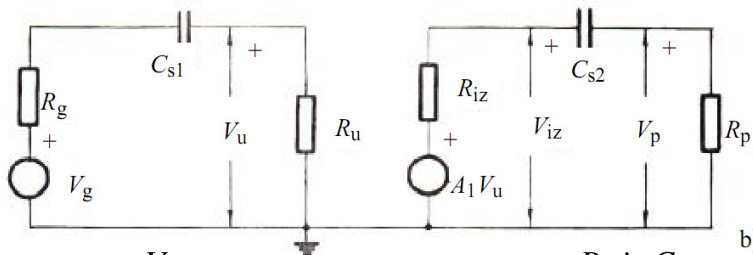


Realni:

RC sprega

Za one koji žele da nauče više

Potrošač priključen za pojačavač preko C_{S2}



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

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

$$\tau_{C2} = C_{C2} (R_i + R_p)$$

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

Realni:

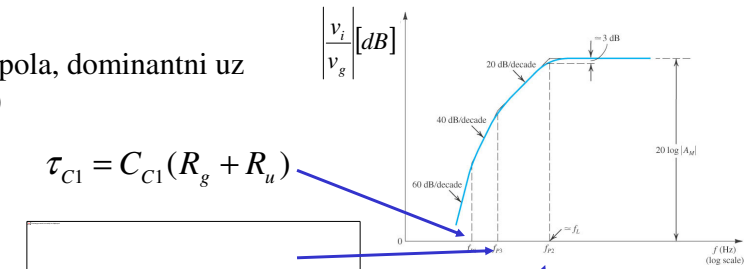
RC sprega

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)

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



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

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

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.

01. decembar 2016.

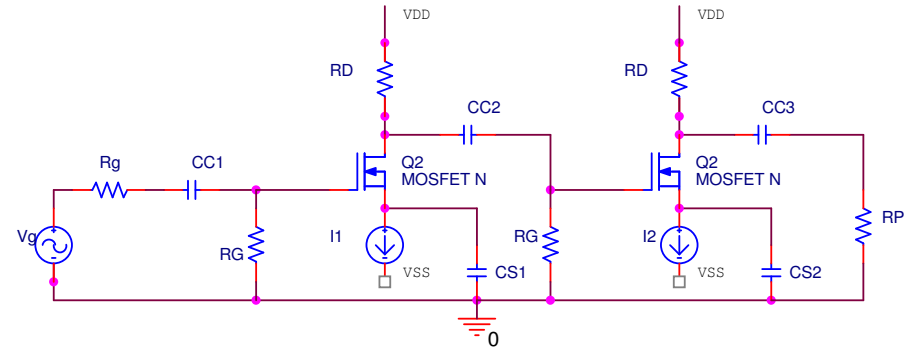
Višestepeni pojačavači

81

RC sprega

Primer:

Dvostepeni MOSFET pojačavač



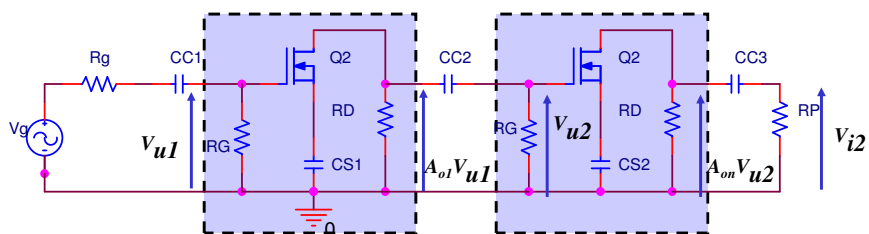
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

82

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač



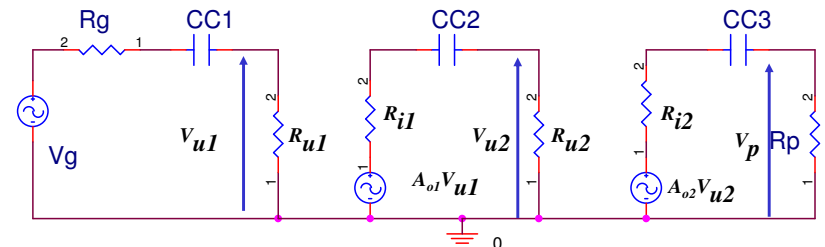
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

83

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač



01. decembar 2016.

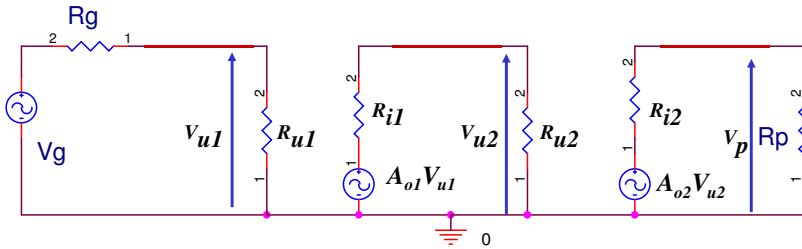
Višestepeni pojačavači

84

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



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

$$A_u = \frac{R_p}{R_p + R_{i2}} A_{o2} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} A_{o1} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} = A_{o1} A_{o2} \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_g} \frac{R_{u2}}{R_{u2} + R_{i1}} \frac{R_p}{R_p + R_{i2}}$$

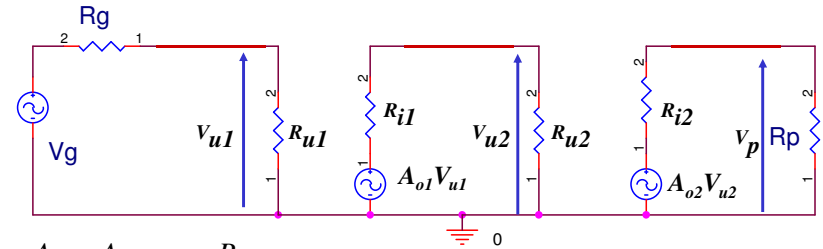
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



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

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

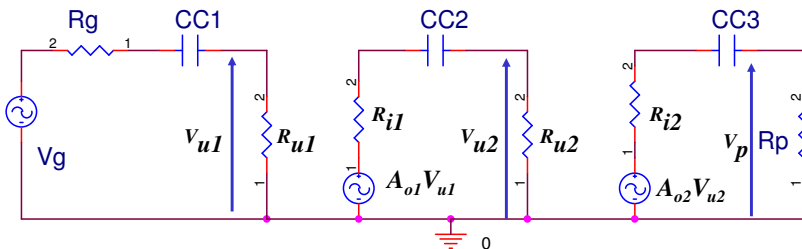
$$R_{i1} = R_{i2} = R_D \parallel r_o \approx R_D$$

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

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



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

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

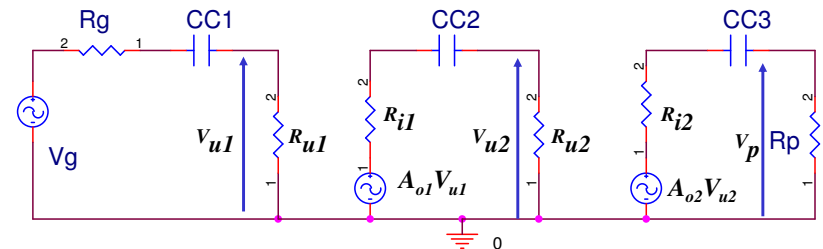
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



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

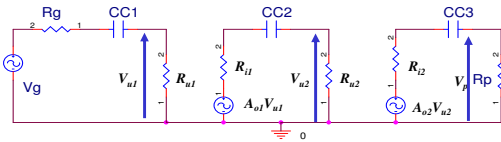
$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{c1} R_g}{1 + j\omega C_{c1} (R_g + R_g)} \frac{j\omega C_{c2} R_g}{1 + j\omega C_{c2} (R_g + R_D)} \frac{j\omega C_{c3} R_p}{1 + j\omega C_{c3} (R_p + R_D)}$$

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
NF



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

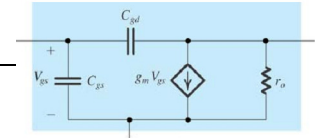
$$C_{C1} = C_{C2} = C_{C3} = C_C$$

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

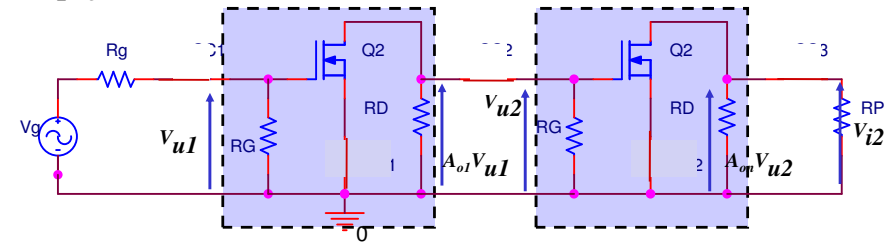
$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_G}{1 + j\omega C_{C1} (R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_G}{1 + j\omega C_{C2} (R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3} (R_p + R_D)}$$

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF



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

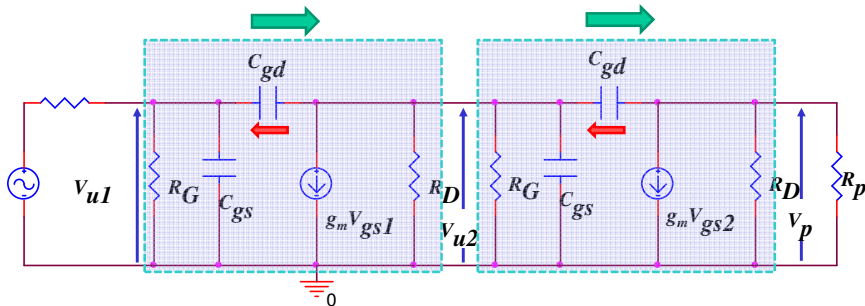


Dominiraju parazitne kapacitivnosti tranzistora.

RC sprega

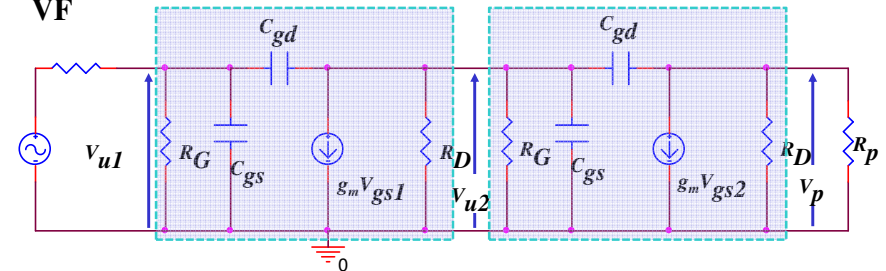
Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF

Tranzistor nije unilateralan usled C_{gd}



RC sprega

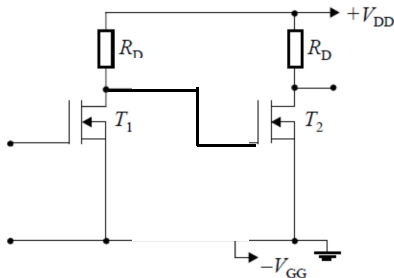
Dvostepeni MOSFET pojačavač
VF



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.

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).



01. decembar 2016.

93

Problemi – izazovi

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

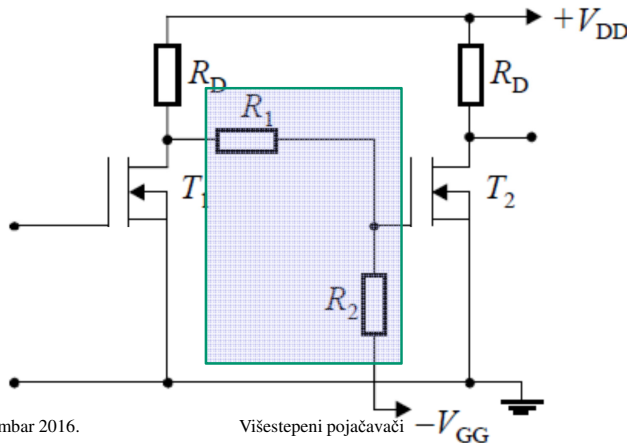
Ključno je stabilizovati prvi stepen jer ga ostali “prate” i pojačavaju efekte

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

94

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

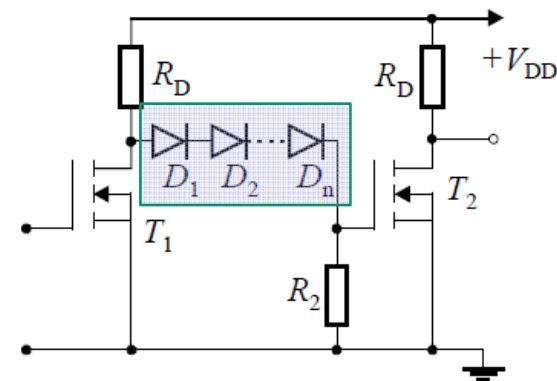


01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

95

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



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

96

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.

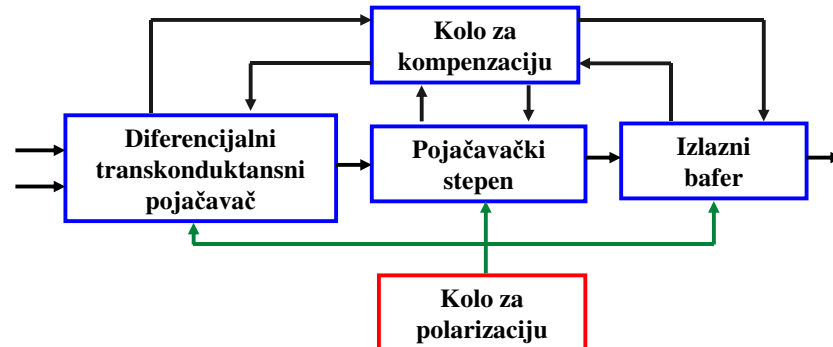
Izvore konstantne struje smo pominjali.

Pojedinim granama podešava se RT korišćenjem složenijih strujnih ogledala.

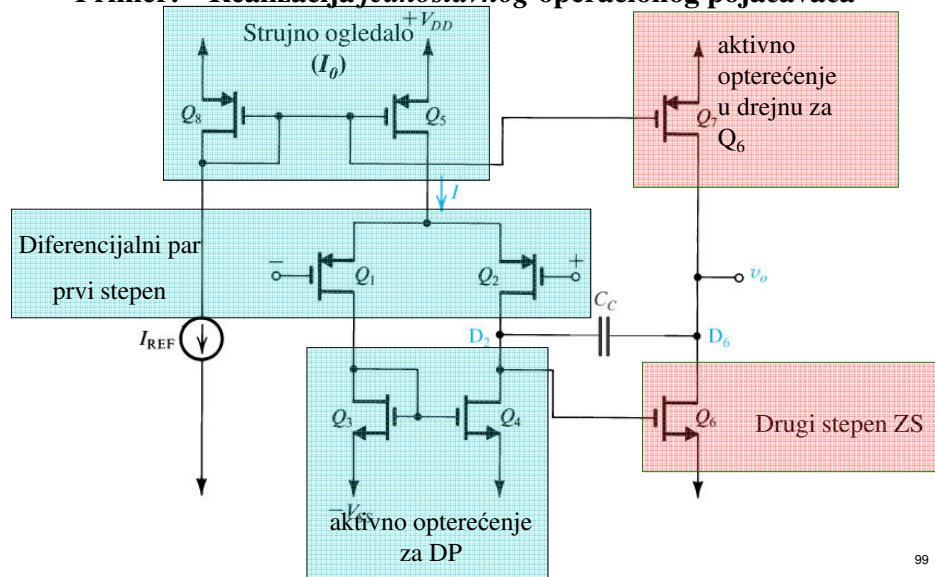
Za definisanje referentne struje i RT* neophodno je obezbediti polarizaciju preko izvora referentnog napona.

(* Npr. za ZG kod kaskodnih pojačavača)

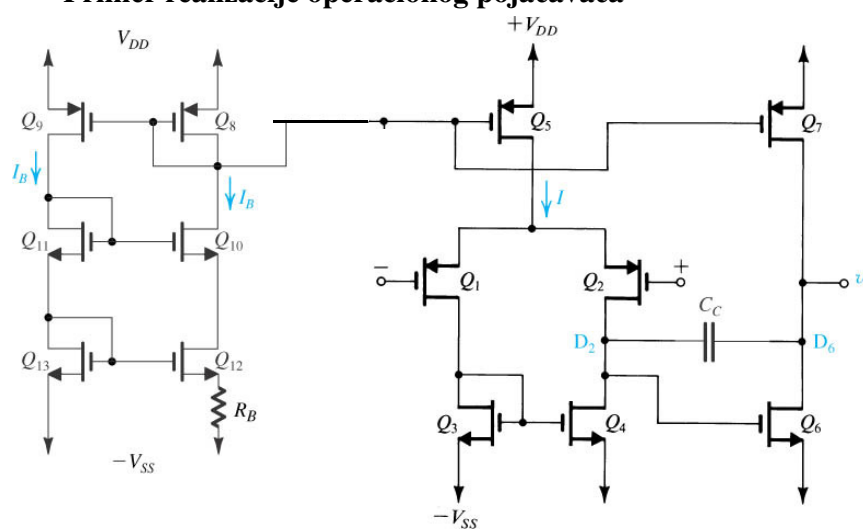
Blok šema operacionog pojačavača



Primer: Realizacija jednostavnog operacionog pojačavača

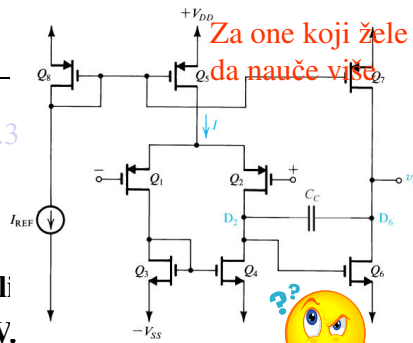


Primer realizacije operacionog pojačavača



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



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 (kΩ)								

Jednostepeni pojačavači sa MOST



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

01. decembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

102

Jednostepeni pojačavači sa MOST



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.

Višestepeni pojačavači

Sledećeg časa

Pojačavači sa negativnom povratnom spregom

01. decembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

103

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

104

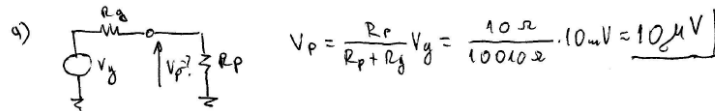
Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 7:

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

- Direktno;
- preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri: $R_E=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$;
- preko pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri: $R_C=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$;
- preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz tačke c) (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za R_p).



01. decembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

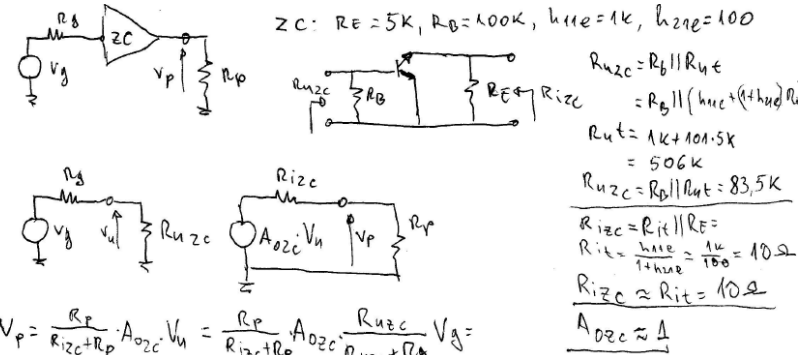
105

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 7 (nastavak):

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



01. decembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

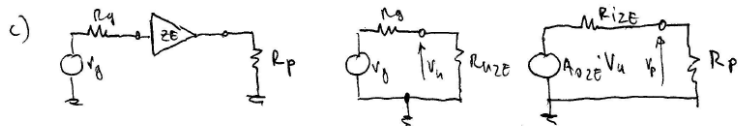
106

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 6 (nastavak):

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



$$R_{u2E} = R_B \parallel R_{u1E} = R_B \parallel h_{11E} \approx h_{11E} = 1k$$

$$R_{i2E} = R_C \parallel R_{i1E} = R_C = 5k$$

$$A_{02E} = -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} R_C = -\frac{100}{1k} \cdot 5k = -500$$

$$V_p = \frac{R_p}{R_{i2E} + R_p} \cdot A_{02E} \cdot V_{u1} = \frac{R_p}{R_{i2E} + R_p} \cdot A_{02E} \cdot \frac{R_{u2E}}{R_g + R_{u2E}} \cdot V_g = \frac{10}{5010} \cdot (-500) \cdot \frac{1k}{10k + 1k} \cdot 10 mV = 9 mV$$

01. decembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

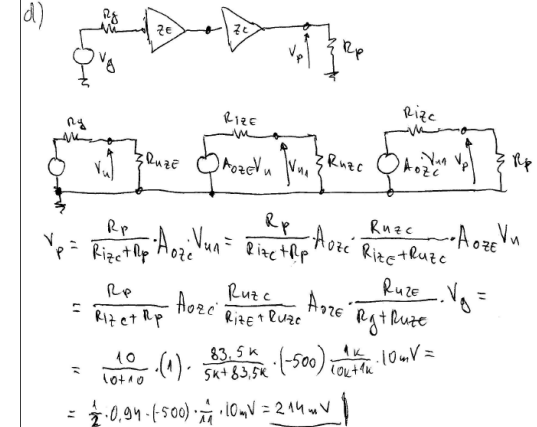
107

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 6 (nastavak):

d) preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz tačke c) (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za R_p).



01. decembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

108

Strujna

$$I_{C1} = f_1(V_{B1} - V_{BE2})$$

$$I_{C2} = f_2(V_{B1} - V_{BE2})$$

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

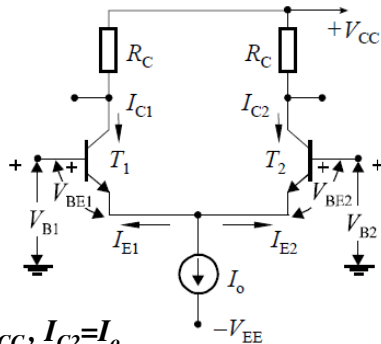
$$I_{C1} + I_{C2} \approx I_o$$

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



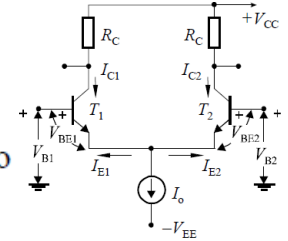
Raspon (dinamika) izlaznog signala

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

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

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

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



Raspon (dinamika) ulaznog signala?

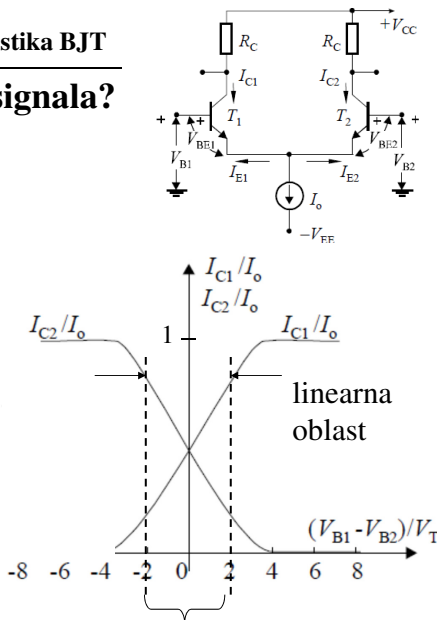
$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$

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

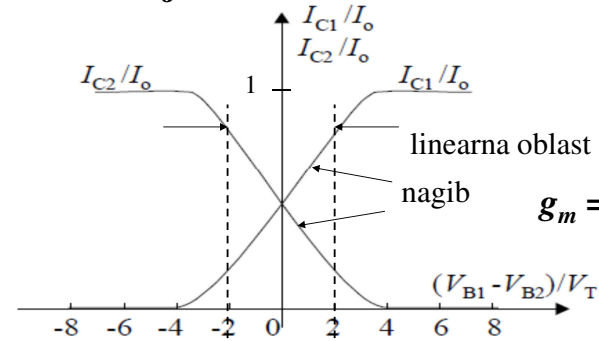
$$-I_E = I_s e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_{C1} = -I_{E1} = \frac{I_o}{1 + e^{-(V_{B1} - V_{BE2})/V_T}}$$

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



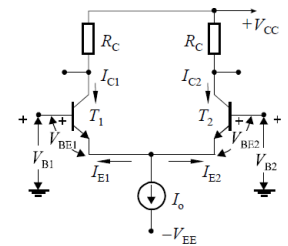
Strujna



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

Pojačanje direktno zavisi od struje

**I_o
Veće I_o , veće pojačanje**



Za one koji žele
da nauče više

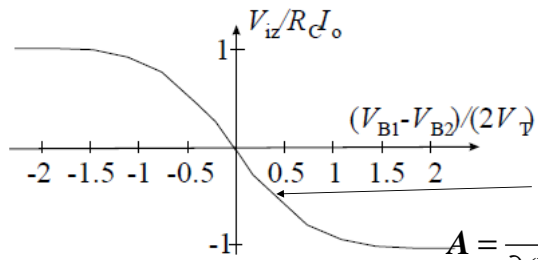
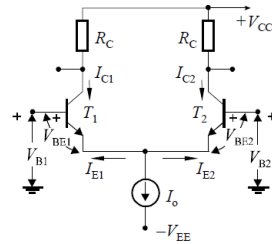
Statička prenosna karakteristika BJT

Naponska

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

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

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



nagib

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

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

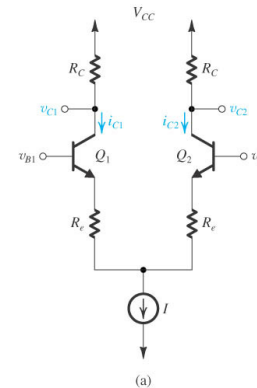
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

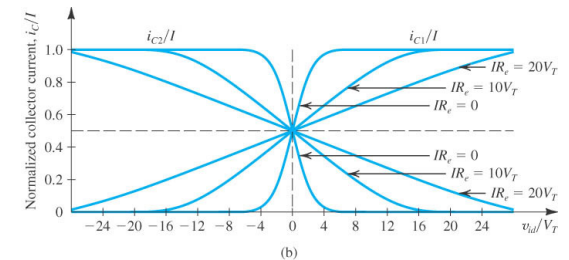
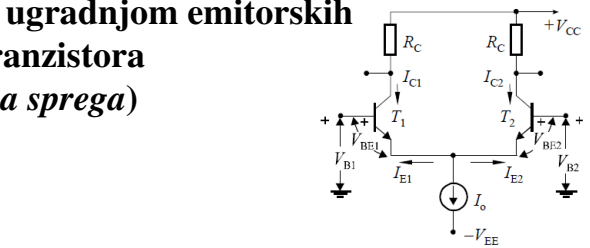
Statička prenosna karakteristika BJT

Za one koji žele
da nauče više

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



01. decembar 2016.



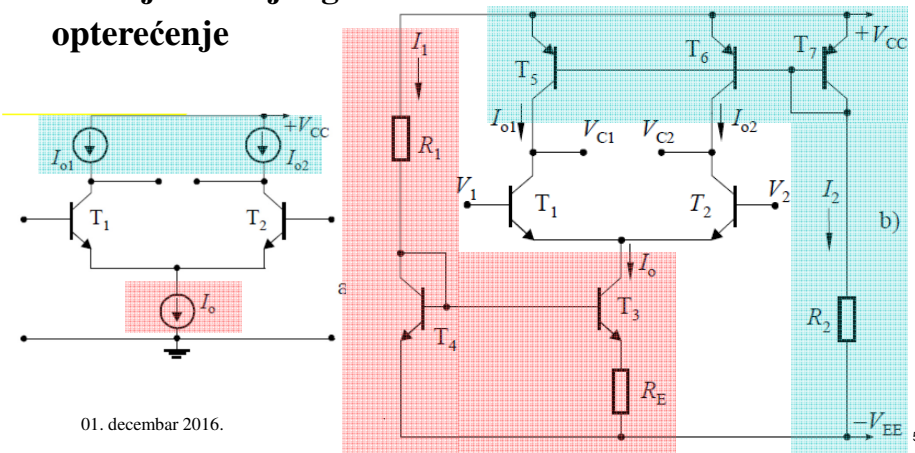
Višestepeni pojačavači

Diferencijalni pojačavači

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje zahteva veće R_C (R_D)

Rešenje – strujni generatori kao dinamičko
opterećenje



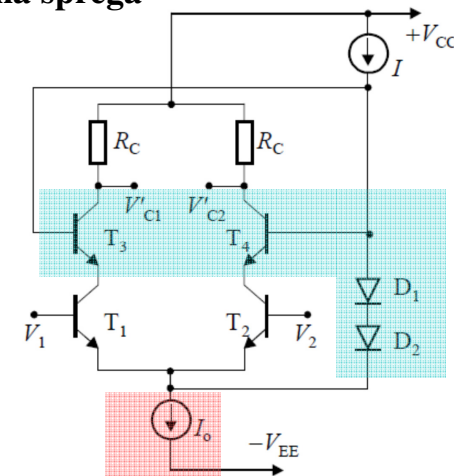
01. decembar 2016.

Poboljšanje performansi

Za one koji žele
da nauče više

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega



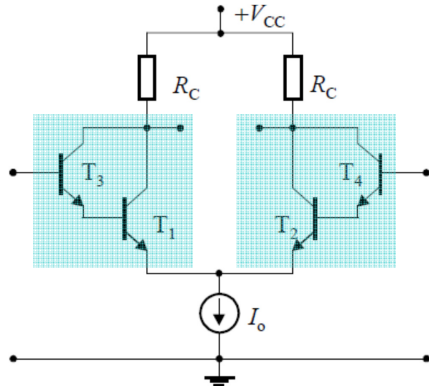
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Veće pojačanje – tranzistori sa većim β

Veća ulazna otpornost

Rešenje – Darlingtonov par



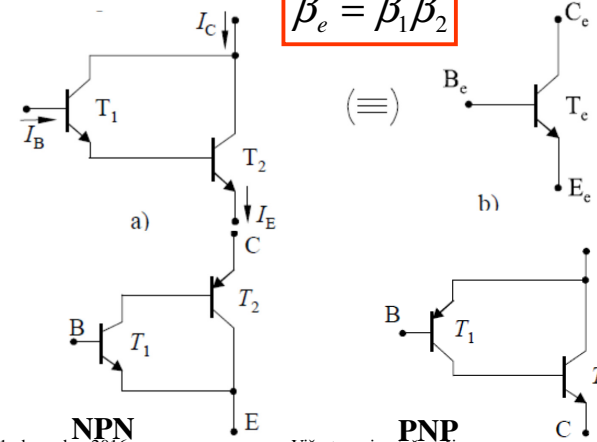
01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

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

Darlingtonova sprega

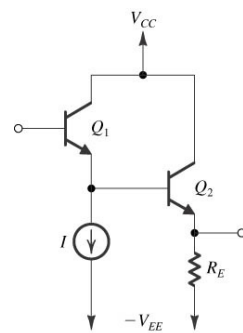
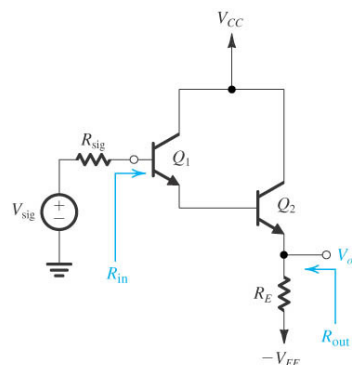
$$\beta_e = \beta_1 \beta_2$$



01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Darlingtonova sprega



ZC-ZC veza

Velika ulazna, mala izlazna otpornost

I obezbeđuje da Q1 radi u oblasti sa velikim β

01. decembar 2016.

Višestepeni pojačavači

Strujni ofset

Usled nesavršenosti proizvodnje, diferencijalni par imaće različito β .

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

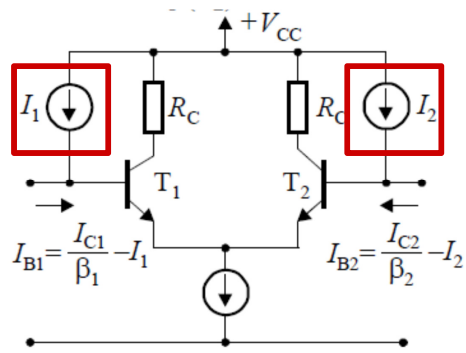
$$I_{os} = I_{B1} - I_{B2} = \left(\frac{I_{C1}}{\beta_1} - I_1\right) - \left(\frac{I_{C2}}{\beta_2} - I_2\right)$$

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

Kompenzacija strujnog ofseta



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

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