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 (21.01.2019.)	50%	20%
	120%	60%



Ukupan skor u januaru može biti 120% PRE ISPITA

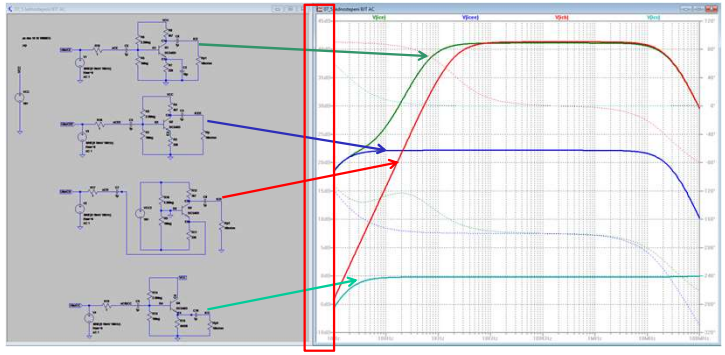
Savet: Izađite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

29. novembar 2018. 1

1

Jednostepeni pojačavači sa BJT

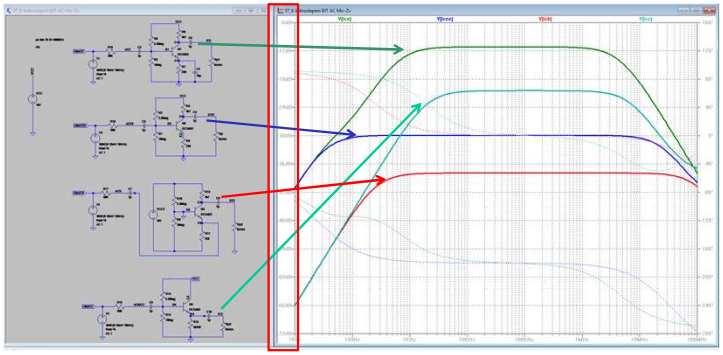
Da se podsetimo: Rgen=1Ω, Rp=10kΩ



20. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 2

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Da se podsetimo: Rgen=600Ω, Rp=8Ω



20. novembar 2018. Jednostepeni pojačavači sa BJT 3

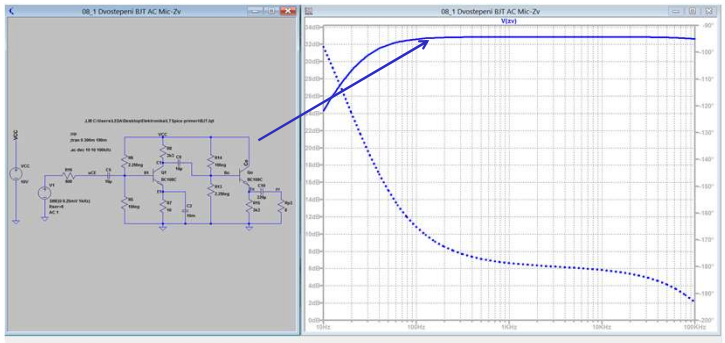
Da se podsetimo



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

29. novembar 2018. Višestepeni pojačavači 4

Da se podsetimo: Rgen=600Ω, Rp=8Ω





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

Ali pre toga...

Da li i kako mogu da se poboljšaju osobine?

Diferencijalni pojačavači

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

Zašto diferencijalni ?

Naziv „diferencijalni“ šta znači?



Pojačavaju razliku signala.

Zašto razliku, a ne zbir? - diferencijalni



- poništavanje smetnji

Uz to:

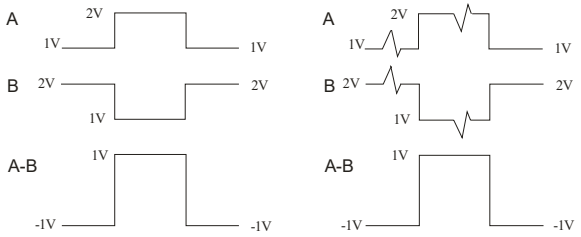
- mala temperaturska osetljivost, mali temperatuski drift

- 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?

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.

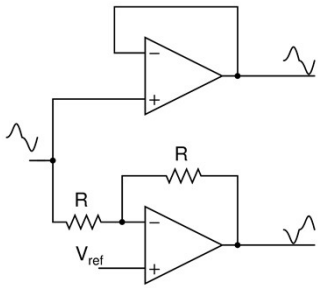
Relativno velika ulazna, koja može da se poveća sa R_S ali i izlazna otpornost.

Kako diferencijalni signal ?

Može ako se pobuđuju signalima suprotnih faza.

Kako napraviti diferencijalni signal?

Kombinovanjem invertorskog i neinvertorskog pojačavača



Realizacija diferencijalnog pojačavača

Dva sa ZS (ZE).

Biramo najbolje rešenje:

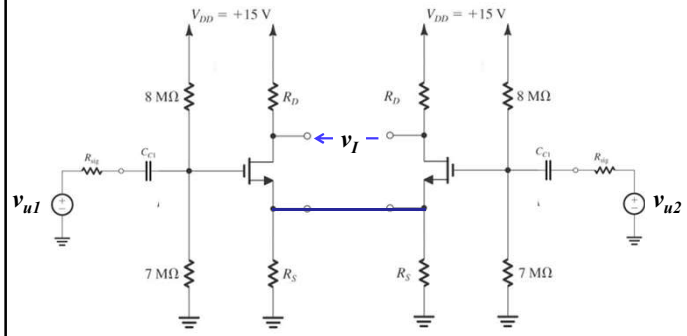
Zbog stabilnosti – otpornost u sorsu (emitoru).

Zbog pojačanja što veća dinamička otpornost u drejnu/kolektoru.

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

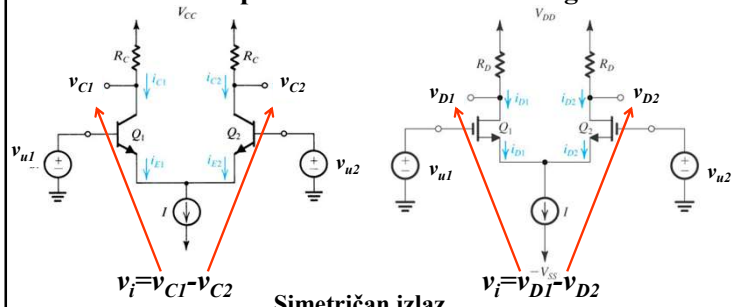
Princip rada

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



Princip rada

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



$v_i = v_{C1} - v_{C2}$ $\quad$ $v_i = v_{D1} - v_{D2}$

Simetričan izlaz

Osobine

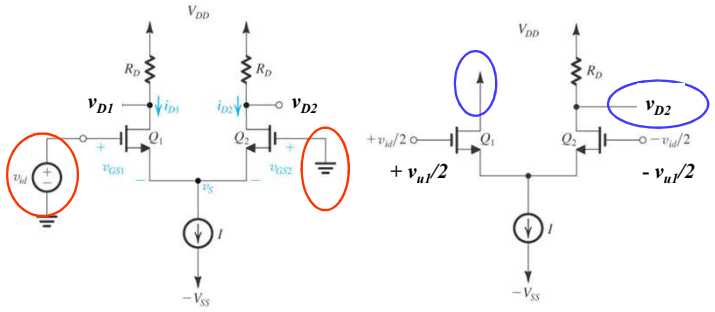
Osobine diferencijalnih pojačavača:

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.

Princip rada

Moguće kombinacije:

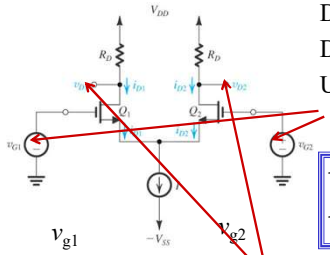
Asimetrični ulaz $\quad$ **Asimetrični izlaz**



$+ v_{u1}/2$ $\quad$ $- v_{u1}/2$

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:



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

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

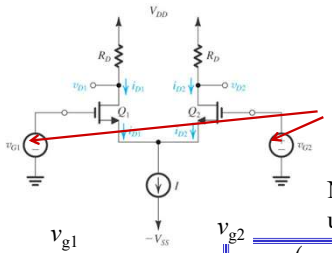
v_{g1} $\quad$ v_{g2}

Korisni: signal razlike na izlazu (diferencijalni)

$$v_{ID} = v_{D1} - v_{D2} = V_{D1} - R_D(g_m v_{g1}) - (V_{D2} - R_D(g_m v_{g2}))$$
$$V_{D1} = (V_{DD} - R_D \frac{I}{2}) = V_{D2}$$
$$v_{ID} = -R_D g_m (v_{g1} - v_{g2}) = -R_D g_m v_{UD}$$

Realizacija sa MOST

Primer MOS pojačavač:



v_{g1} v_{g2}

Neželjeni: zajednički napon na oba ulaza - signal srednje vrednosti

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

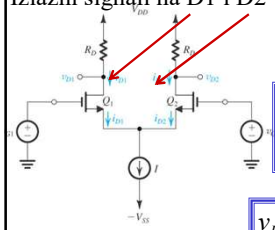
$$v_{US} = V_G + \frac{(v_{g1} + v_{g2})}{2} \equiv v_{UCM} \equiv v_{UC}$$

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

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

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

0

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

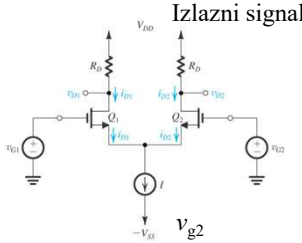
$$v_{IS} = V_D + \frac{(v_{d1} + v_{d2})}{2} \equiv v_{ICM} \equiv v_{IC}$$

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



v_{g2}

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

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

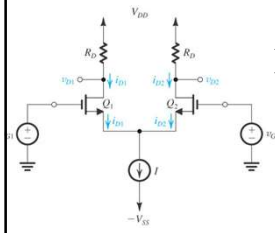
Faktor potiskivanja srednje vrednosti

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:

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

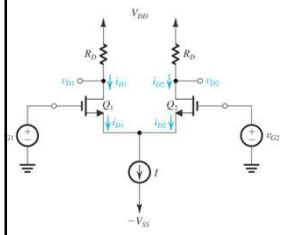
$$\begin{pmatrix} g_m \equiv S \\ r_o \equiv R_i \\ g_m r_o \equiv \mu \end{pmatrix}$$

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

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

Videti šestu nedelju predavanja „Jednostepeni MOSFET pojacavaci“.

Realizacija sa MOST



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

CMRR veće za veće R_S

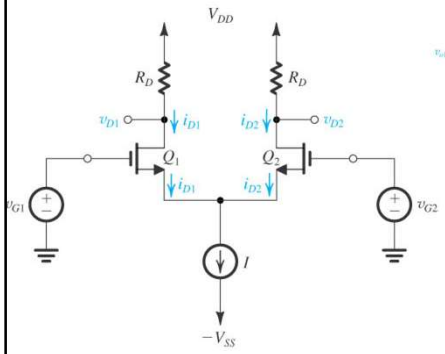
Zato?

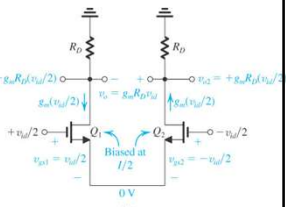


izvor konstantne struje umesto R_S.

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0.





Za simetrični izlaz

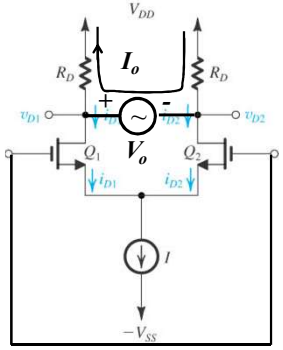
$A_c=0$.

$A_d=-g_mR_D$.

$\rho\rightarrow\infty$

Realizacija sa MOST

izvor konstantne struje umesto R_0.



Izlazna otpornost

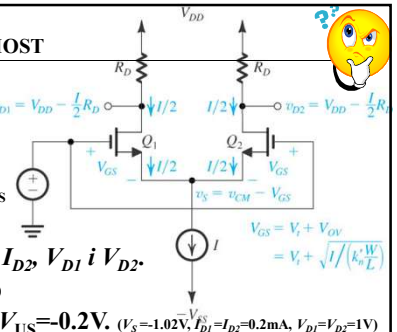
$$R_i=\frac{V_o}{I_o}=R_{D1}+R_{D2}=2R_D$$

Dva puta veća nego kod pojačavača sa ZS!!!

Realizacija sa MOST

Domaći 8.1:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa V_t=0.5V, $\mu_nC_{ox}'W/L=2A$=4mA/V², λ=0. Poznato je I=0.4mA, $V_{DD}=V_{SS}$=1.5V i R_D=2.5kΩ.



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)

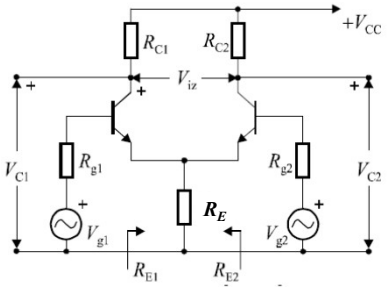
d) Koliko iznosi najveći napon V_{US} pri kome je I=0.4mA, a tranzistori rade u oblasti zasićećnja? (V_{USmax}=1.5V)

e) Odrediti A_d, A_c i *CMMR*. (g_m=1.25mA/V, A_d =-3.125V/V, A_c =0, CMRR →∞)

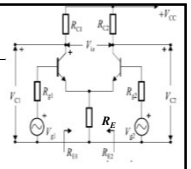
E7.1

Za one koji žele da nauče više

Primer BJT pojačavač:



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 $R_{g1}=R_{g2}=0$.

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

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

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

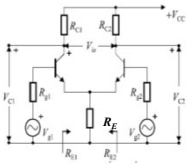
Pojačanje sa ZE

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

Za one koji žele da nauče više

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

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

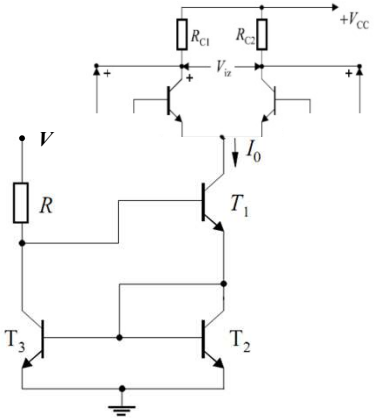


Za tipične vrednosti *h*-parametara kao što su h_{11E}=2 kΩ h_{21E}=150 i h_{22E}=1/R_0=25 μA/V, dobija se ρ = 6000.

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

Za one koji žele da nauče više

Wilsonov strujni izvor - veće R_E.



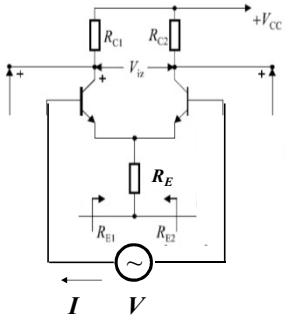
Realizacija sa BJT

Za one koji žele da nauče više

Ulazna otpornost

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

2x veća nego kod ZE



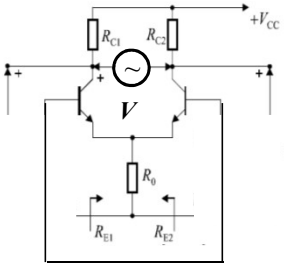
Realizacija sa BJT

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



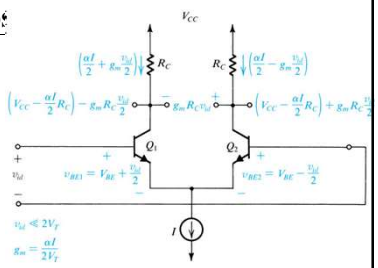
Za one koji žele da nauče više



Realizacija sa MOS

Domaći 8.2 :

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa α=1, V_{BE}=0.7V. Poznato je I=1mA, V_{CC}=15V i R_C=10kΩ, v_{BE1}=5+0.005sin(ωt)V v_{BE2}=5-0.005sin(ωt) V.



Odrediti

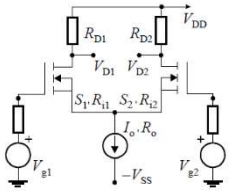
a) i_{C1}, i_{C2}, (i_{C1}=0.5+0.1sin(ωt) mA, i_{C2} =0.5-0.1sin(ωt) mA)

b) v_{C1}, v_{C2}. (v_{C1}=10-1sin(ωt) V, v_{C2}=10+1sin(ωt) V)

c) Ad. (A_d=200V/V)

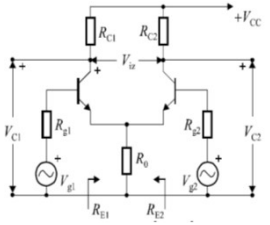
Realizacija sa BJT

MOS v.s. BJT



$R_{uMOS} > R_{uBJT}$

$g_{mMOS} < g_{mBJT}$



Prenosne karakteristike

zavisnost trenutne vrednosti izlazne veličine od trenutne vrednosti ulazne veličine.

Statička –

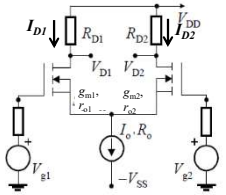
za spore signale – bez reaktivnih elemenata

Dinamička –

za VF – sa reaktivnim elementima

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

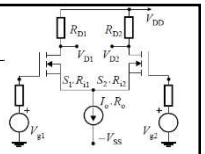
$V_{GS1} < V_t$ **i počinje da raste:**
V_{G1} **malo, T1 zakočen,** $I_{D1}=0$
$V_{DS1max}=V_{DD}$.
Za $V_{G2} > V_t$ **, T2 vodi,** $I_{D2}=I_o$ **,**
$V_{DS2min} = V_{DD} - I_o R_D$



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

Raspon (dinamika) izlaznog signala



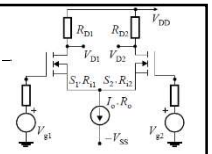
$V_{izmax} = (V_{DS2max} - V_{DS1min}) = V_{DD} - (V_{DD} - I_o R_D)$
$V_{izmax} = I_o R_D$

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

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

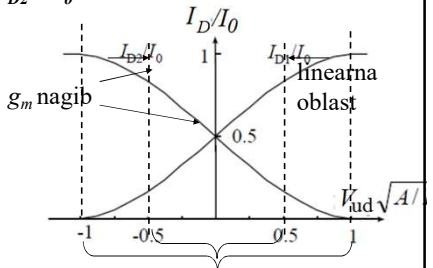
Raspon (dinamika) izlaznog signala proporcionalna sa R_D **i** I_o**.**

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



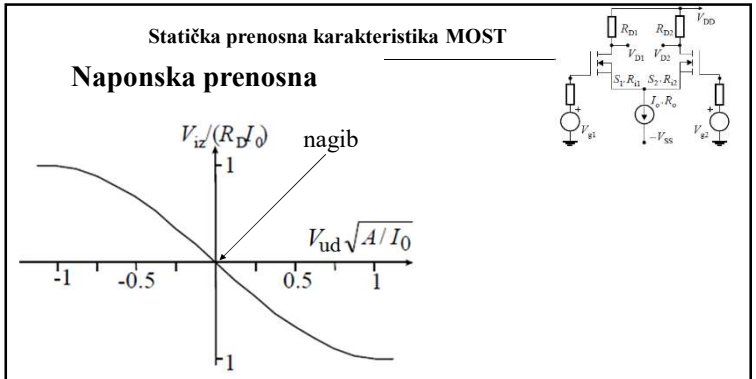
Za $V_{ud} = (I_o/A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = I_o$ **,** $I_{D2}=0$
Za $V_{ud} = -(I_o/A)^{1/2} \rightarrow I_{D1} = 0$, $I_{D2} = I_o$

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



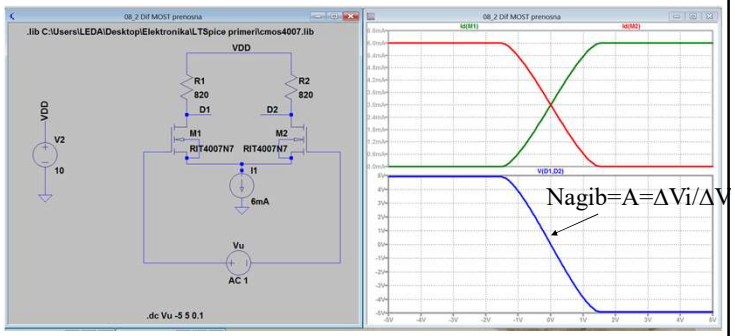
Statička prenosna karakteristika MOST

Naponska prenosna



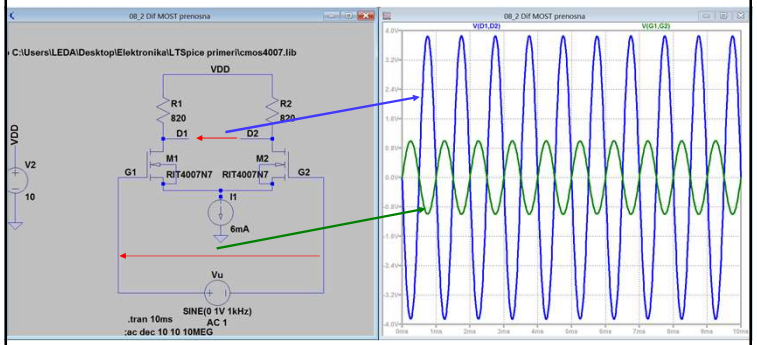
Statička prenosna karakteristika MOST

Naponska prenosna



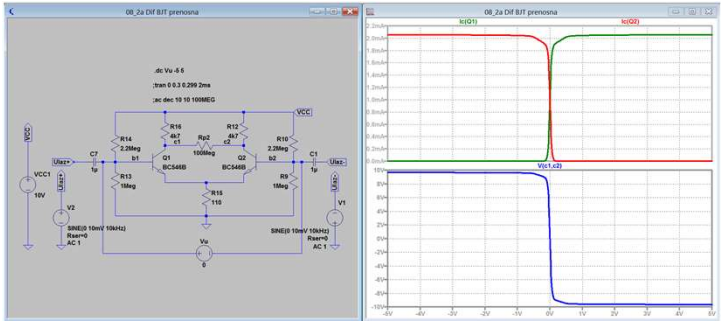
Diferencijalni pojačavač sa MOST

Talasni oblici napona



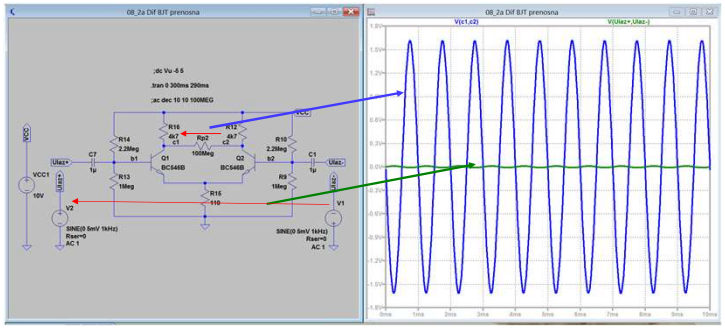
Diferencijalni pojačavač sa BJT

Statička prenosna karakteristika



Diferencijalni pojačavač sa BJT

Talasni oblici napona

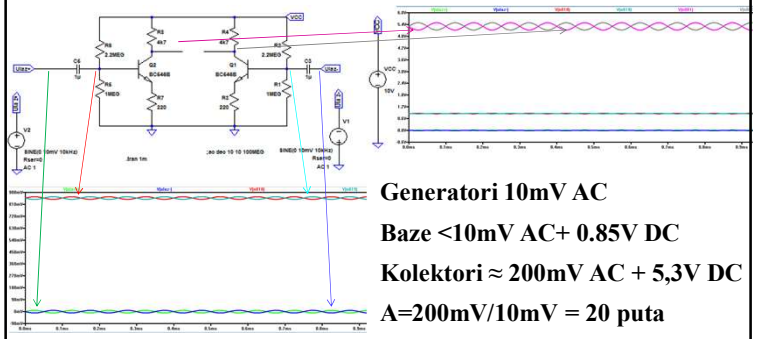


Za one koji žele da nauče više

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

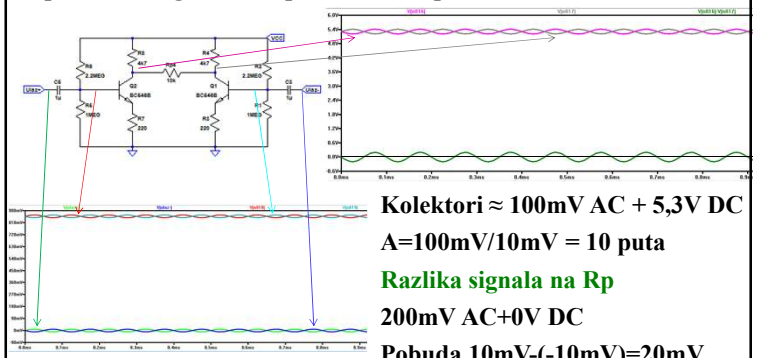
Kolektori ≈ 200mV AC + 5,3V DC

A=200mV/10mV = 20 puta

Uporedni pregled vremenski domen

Dva pojačavača sa ZE i RE sa Rp=10k između kolektora

pobuđena signalima u protivfazi, amplitude 10mV



Kolektori ≈ 100mV AC + 5,3V DC

A=100mV/10mV = 10 puta

Razlika signala na Rp

200mV AC+0V DC

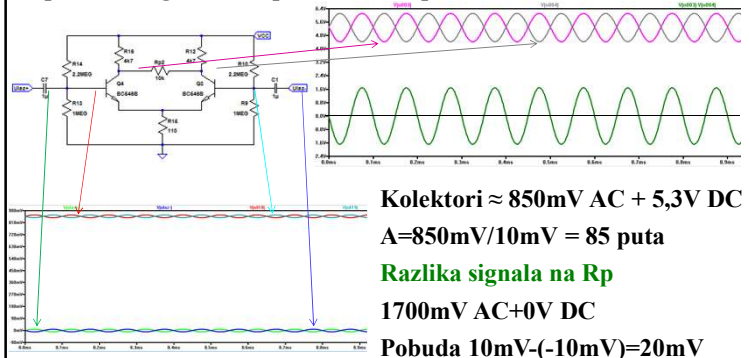
Pobuda 10mV-(-10mV)=20mV

Ad=200mV/20mV=10 puta

Uporedni pregled vremenski domen

Diferencijalni pojačavač sa Rp =10k između kolektora

pobuđen signalima u protivfazi, amplitude 10mV



Kolektori ≈ 850mV AC + 5,3V DC

A=850mV/10mV = 85 puta

Razlika signala na Rp

1700mV AC+0V DC

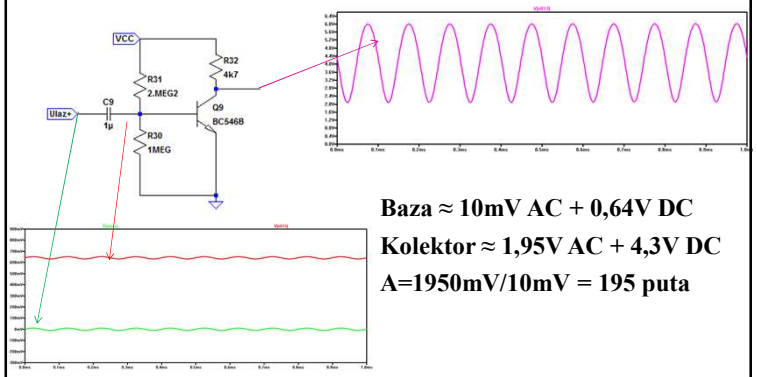
Pobuda 10mV-(-10mV)=20mV

Pojačanje Ad=85

Uporedni pregled vremenski domen

Običan pojačavač sa ZS

pobuđen signalom amplitude 10mV

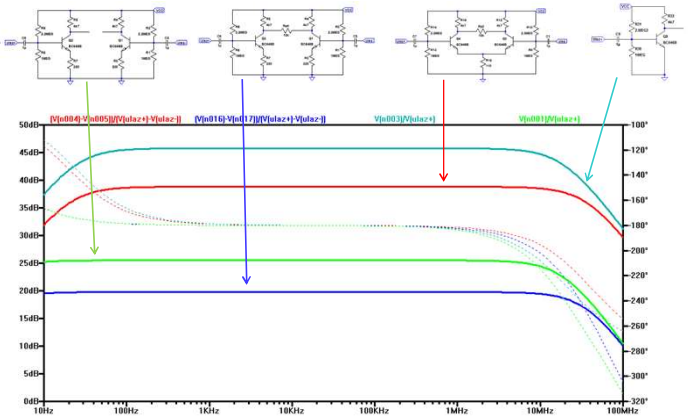


Baza ≈ 10mV AC + 0,64V DC

Kolektor ≈ 1,95V AC + 4,3V DC

A=1950mV/10mV = 195 puta

Uporedni pregled frerkvencijske karakteristike



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).**

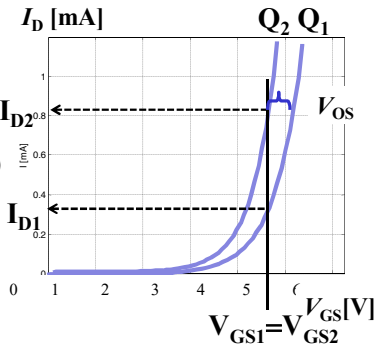
Diferencijalni pojačavači

1. **Naponska razdešenost - ofset**

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

Zašto?



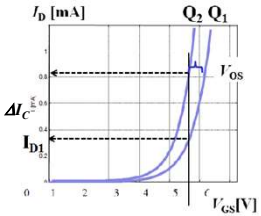


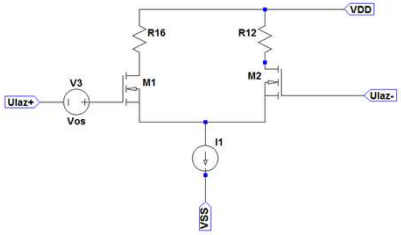
$V_{IZ}=V_{D1}-V_{D2}=R_D(I_{D1}-I_{D2})$

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

Naponska razdešenost - ofset

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





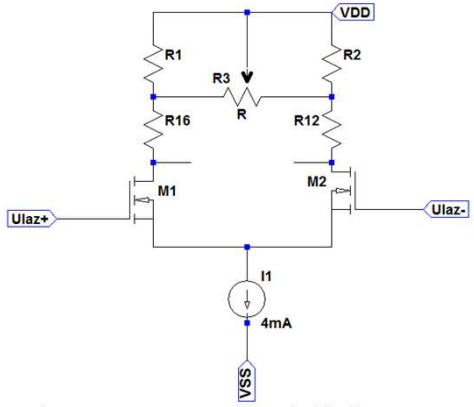
V_{GS} **zavisi od temperature, tako da i *naponska razdešenost* zavisi od temperature - *drift ofset napona***

$\Delta V_{OS}/\Delta T$ (x μV/K)

Manji je kod MOS nego kod bipolarnih

Naponska razdešenost - ofset

Kompenzacija naponskog ofseta

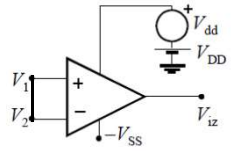


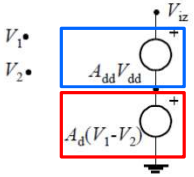
Diferencijalni pojačavač

Faktor potiskivanja napona napajanja

(***Power Supply Rejection Ratio – PSSR***)

Koliko promene napona napajanja utiču na odziv?





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

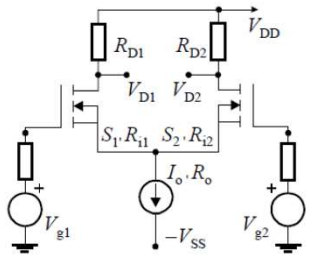
$$V_{iz} = A_d(V_1 - V_2) + A_{dd}V_{dd}$$

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

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

Faktor potiskivanja napona napajanja

Faktor potiskivanja napona napajanja



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

Da bi se povećao faktor potiskivanja napona napajanja treba povećati A_d, odnosno treba povećati R_D.

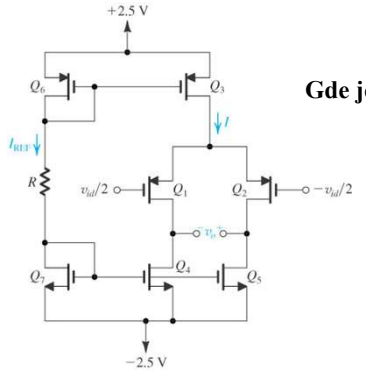
To je moguće uz ...



primenu aktivnog opterećenja u drejnu.

Faktor potiskivanja napona napajanja

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



Gde je ovde ulaz? Izlaz?



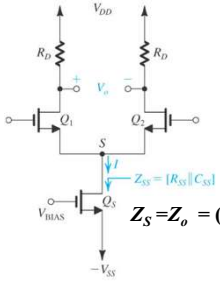
Diferencijalni pojačavač

Frekvencijska karakteristika

Definisana parazitnim kapacitivnostima

Za A_d ista kao kod pojačavača ZE (ZS)

Za A_c treba zameniti R_S sa Z_S $(R_S||C_S)$



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

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

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

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

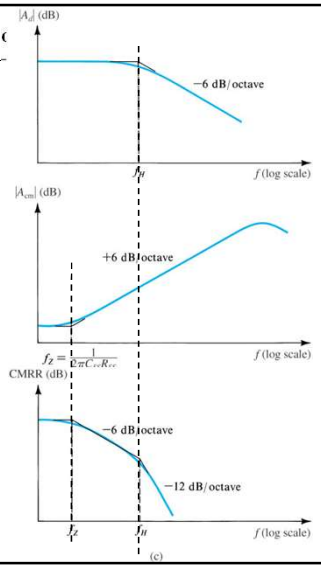
$$A_c = -\frac{R_D}{2R_S}(1 + j(f/f_Z))$$

Frekvencijska karakteristika (

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

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

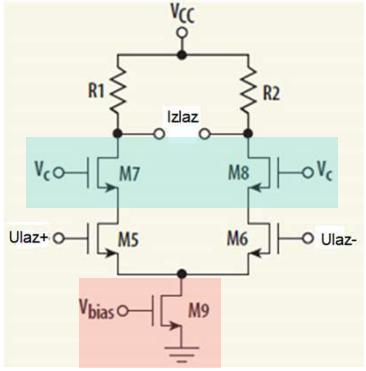
$$\rho = \frac{2g_m R_S}{(1 + j(f/f_v))(1 + j(f/f_Z))}$$



Poboljšanje performansi

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega (primenljiva i kod BJT)

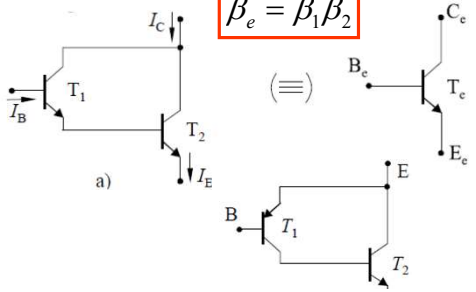


Poboljšanje performansi

Za BJT: ***Darlingtonova sprega***

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

$$\beta_e = \beta_1 \beta_2$$

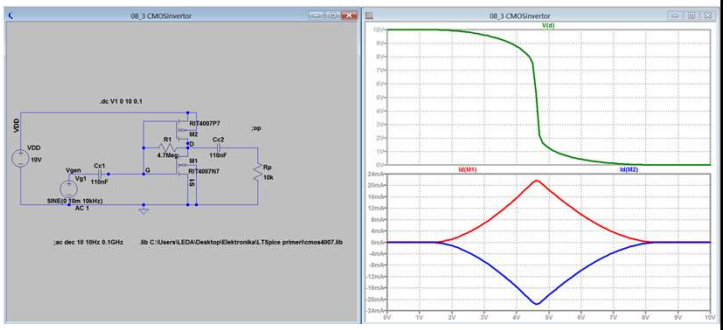


"Kvazi" PNP

CMOS invertor kao pojačavač

CMOS invertor kao pojačavač

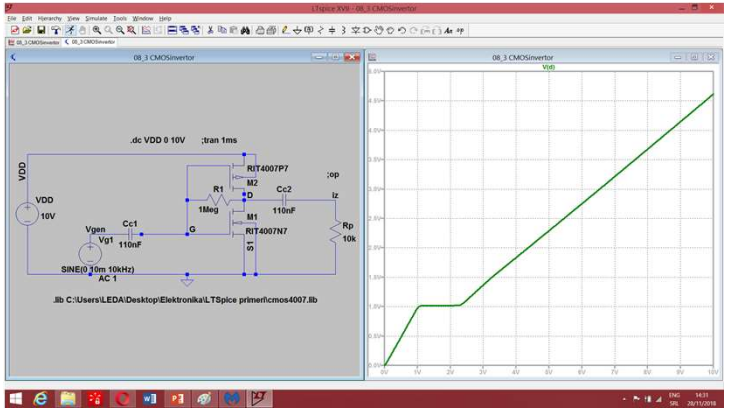
Prenosna karakteristika



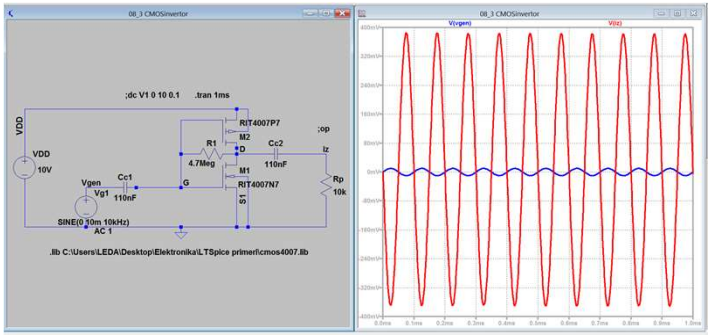
Struja drejna

CMOS invertor kao pojačavač

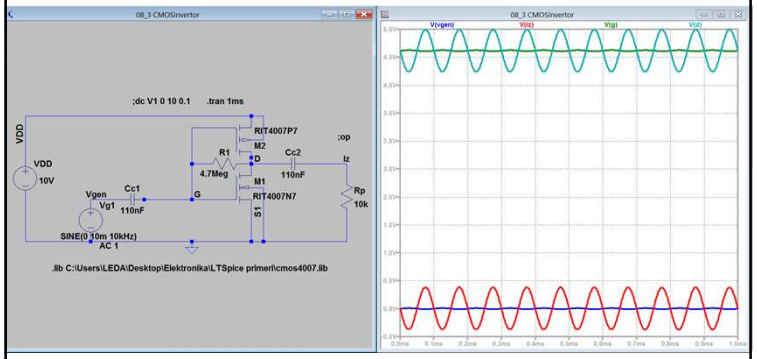
"Samopodešavajuća" radna tačka



CMOS invertor kao pojačavač



CMOS invertor kao pojačavač



Višestepeni pojačavači

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**

Zašto višestepeni pojačavači?



Da bi se dobili BOLJI pojačavači.
Koji su bolji?



Sličniji idealnim:
- **veće pojačanje**
- **optimalna ulazna otpornost**
- **optimalna izlazna otpornost**
- **bolje frekvencijske kakrakteristike (ALI...)**

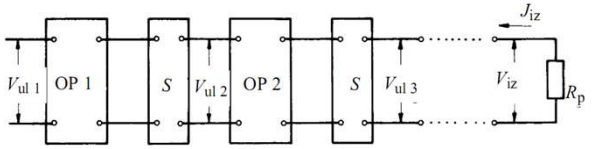
Za naponske pojačavače to znači:
- **Veće pojačanje napona**
- **Ulazna otpornost VEĆA**
- **Izlazna otpornost MANJA**

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 (OP).



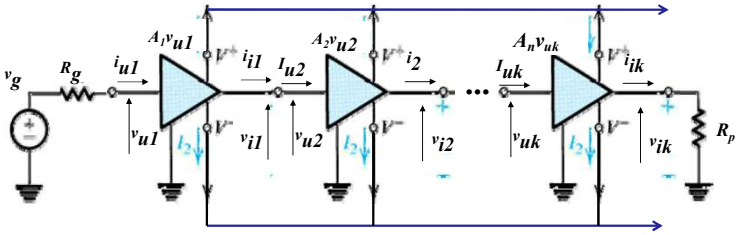
Kaskadna veza pojačavača

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



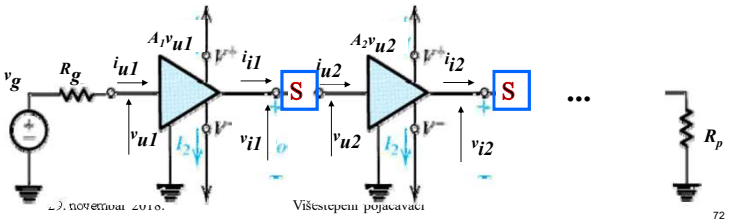
Princip povezivanja višestepenih pojačavača

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

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

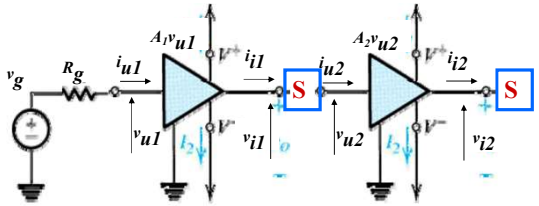
Mora da postoji sprega za naizmenične signale.

Kolo za spregu?



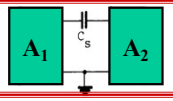
Kako razdvojiti DC a ne oslabiti AC?

Šta čini kolo za spregu "S"?

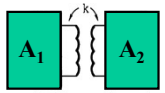


Vrste sprege:

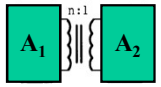
Kapacitivna



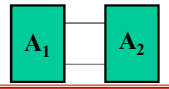
Induktivna



Transformatorska



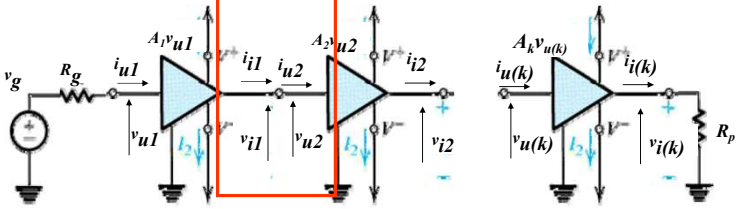
Direktna



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

Tada za naizmenične signale važi:

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

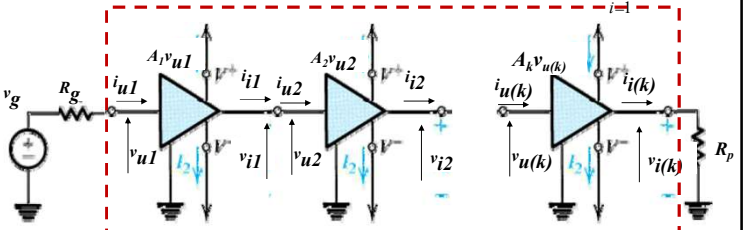


Pojačanje

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

Pojačanje u dB?

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



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.

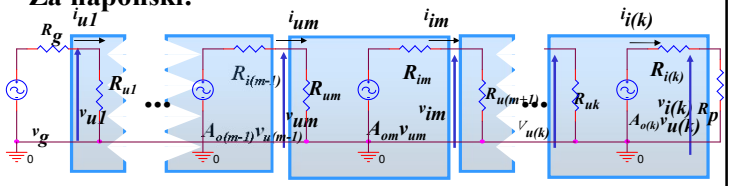
ZATO SU VAŽNE ULAZNE/IZLAZNE OTPORNOSTI!

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

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

Za naponski:



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

Realni:

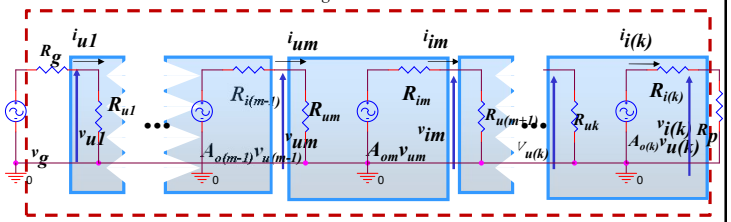
Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele da nauče više

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

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

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



Realni:

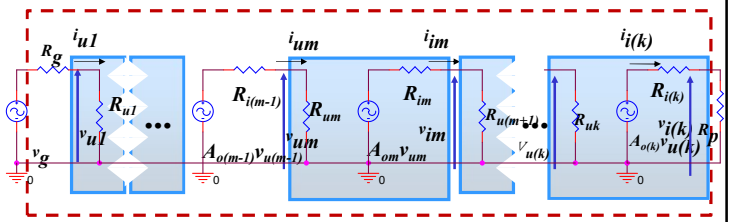
Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje

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

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



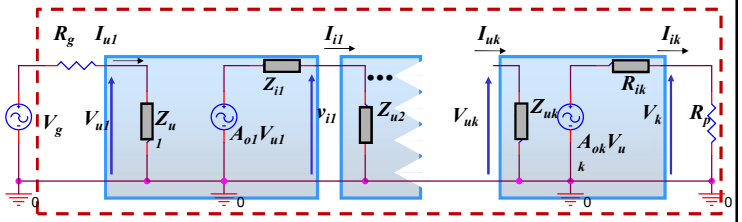
Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

Za one koji žele da nauče više

Ukupno pojačanje pri VF

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



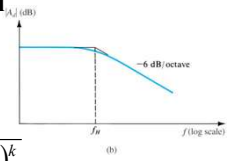
Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

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

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

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



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

gde je

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

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!

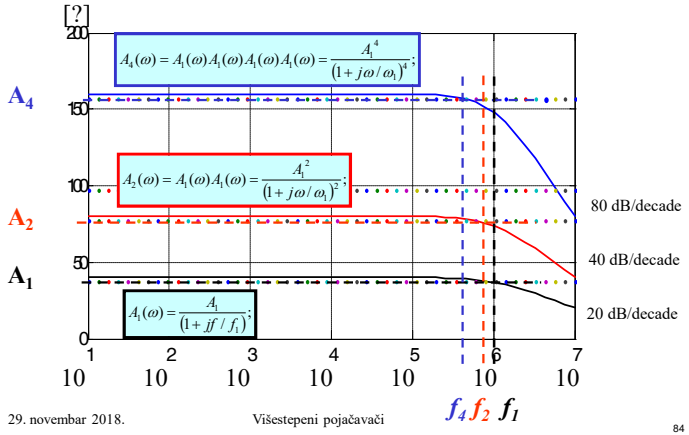
Ukupni propusni opseg se sužava - smanjuje!

Ukupni propusni opseg manji je od najužeg propusnog opsega pojedinačnog pojačavača

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

Ukupno pojačanje pri VF za 1, 2 i 4 stepena



Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

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

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

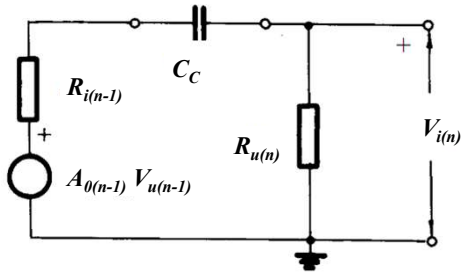
Kolike su vrednosti ulazne/izlazne otpornosti ZB/ZG i ZC/ZD?

Videti petu i šestu nedelju predavanja

Realni:

Osobine višestepenih pojačavača

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



Realni:

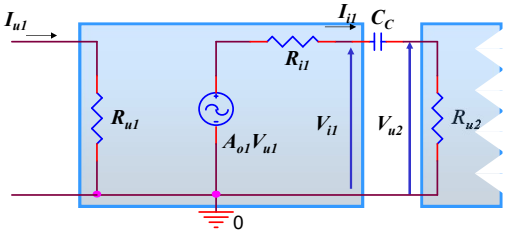
RC sprega

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 DC

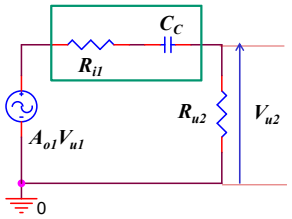


Realni:

Za one koji žele da nauče više

RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF



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

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

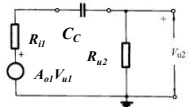
$$A_n = A_{o1}\frac{R_{u2}}{(R_{i1}+R_{u2})}\frac{j\omega C_C(R_{i1}+R_{u2})}{1+j\omega C_C(R_{i1}+R_{u2})}$$

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

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

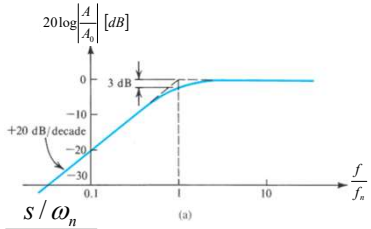
Realni:

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 propusnika visokih frekvencija.

Realni:

RC sprega

Uticaj elemenata za spregu na amplitudsku karakteristiku pri NF

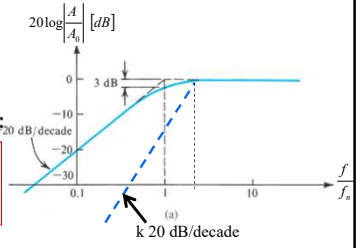
Pretpostavimo da je *k* pojačavača vezano kaskadno i da su pojačavači identični tako da je:

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

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

Tada će granična frekvencija biti:

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

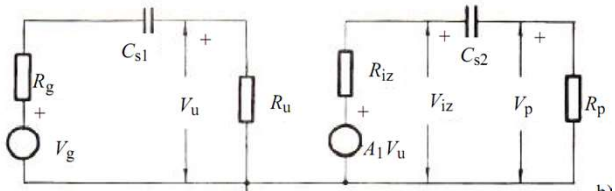


Realni:

RC sprega

Za one koji žele da nauče više

Potrošač priključen za pojačavač preko C_{S2}



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

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

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

Realni:

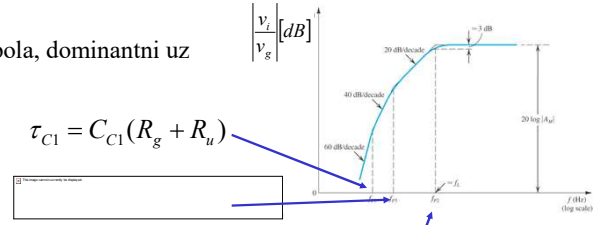
RC sprega

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)

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



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

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

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.

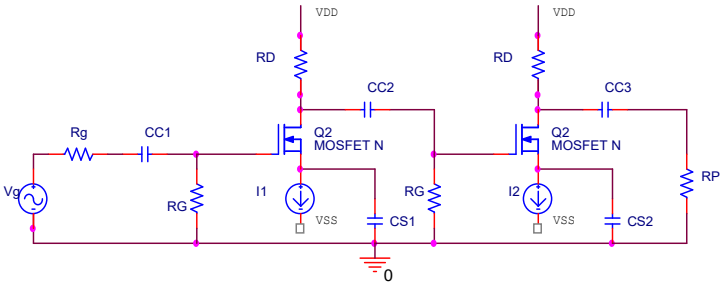
Na Z_i prethodnog stepena utiče Z iz pobude.

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

RC sprega

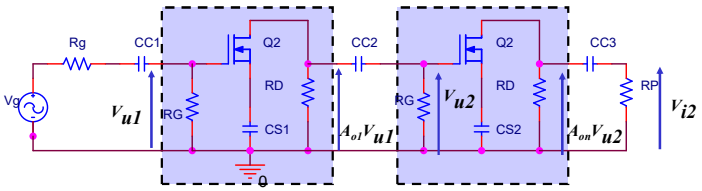
Primer:

Dvostepeni MOSFET pojačavač



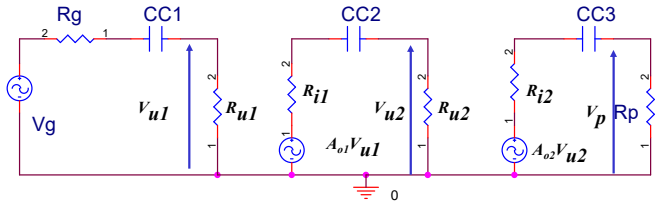
RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač



RC sprega

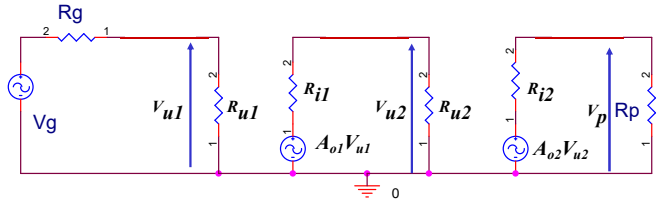
Dvostepeni MOSFET pojačavač



RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



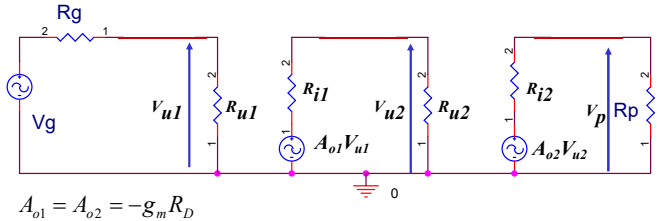
$$A_u = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_{u2}}\frac{V_{u2}}{V_{u1}}\frac{V_{u1}}{V_g}$$

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

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

SF



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

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

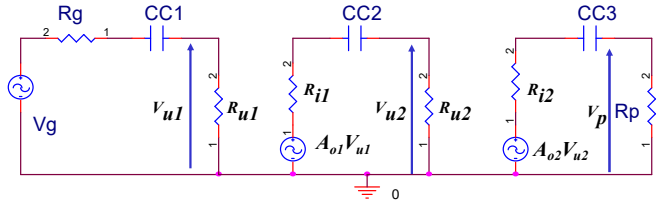
$$R_{i1} = R_{i2} = R_D \| r_o \approx R_D$$

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

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



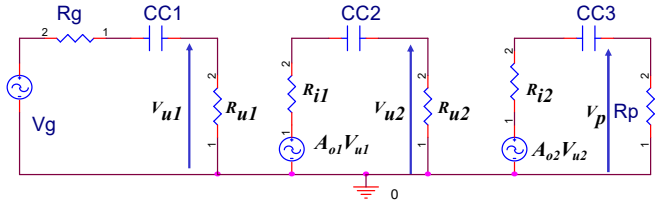
$$A_u = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_{u2}}\frac{V_{u2}}{V_{u1}}\frac{V_{u1}}{V_g}$$

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

RC sprega

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF

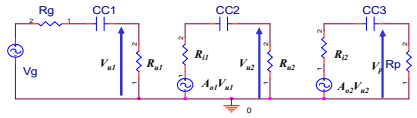


$$A_u = A_{o1}A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_{u1}}{1 + j\omega C_{C1}(R_{u1} + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_{u2}}{1 + j\omega C_{C2}(R_{u2} + R_{i1})} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1 + j\omega C_{C3}(R_p + R_{i2})}$$

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

Dvostepeni MOSFET pojačavač

NF



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

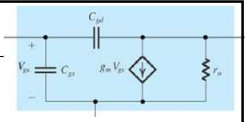
$$C_{C1} = C_{C2} = C_{C3} = C_C$$

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

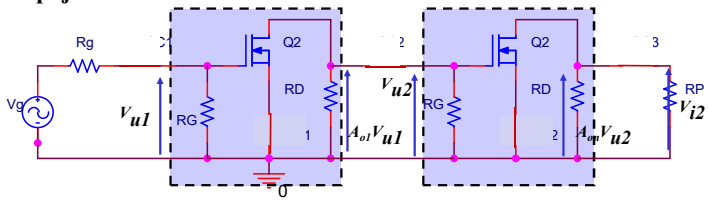
$$A_u = A_{o1} A_{o2} \frac{j\omega C_{C1} R_G}{1+j\omega C_{C1}(R_G + R_g)} \frac{j\omega C_{C2} R_G}{1+j\omega C_{C2}(R_G + R_D)} \frac{j\omega C_{C3} R_p}{1+j\omega C_{C3}(R_p + R_D)}$$

Dvostepeni MOSFET pojačavač

VF



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

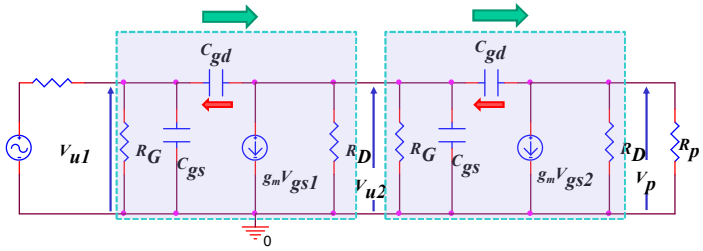


Dominiraju parazitne kapacitivnosti tranzistora.

Dvostepeni MOSFET pojačavač

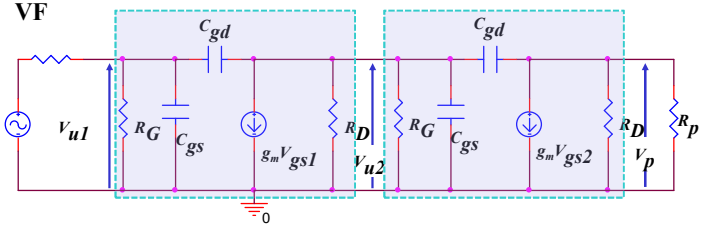
VF

Tranzistor nije unilateralan usled C_{gd}



Dvostepeni MOSFET pojačavač

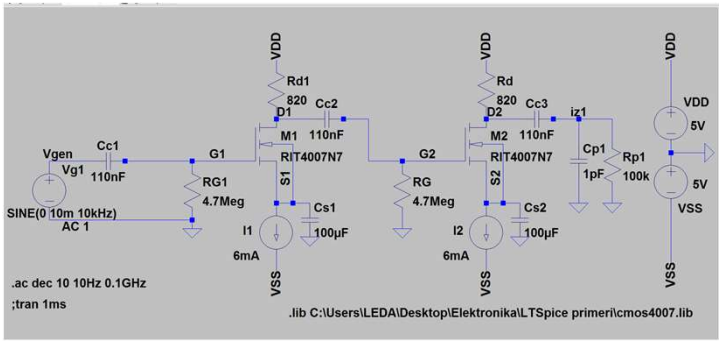
VF



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.

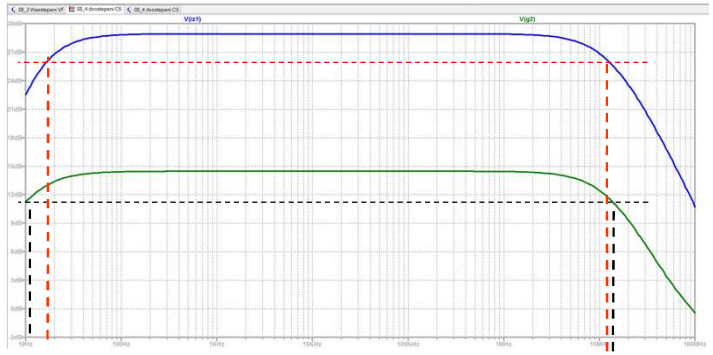
RC sprega

Realni dvostepeni MOSFET CS pojačavač



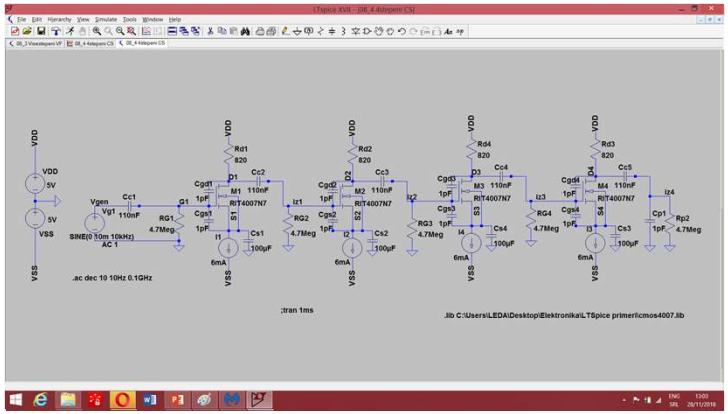
RC sprega

Realni dvostepeni MOSFET CS pojačavač



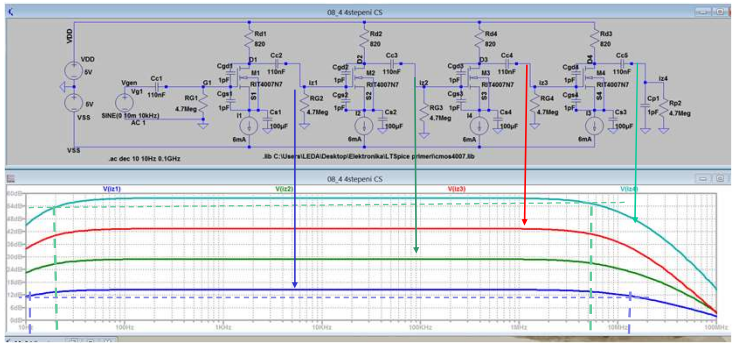
RC sprega

Realni četvorostepeni MOSFET CS pojačavač



RC sprega

Realni četvorostepeni MOSFET CS pojačavač

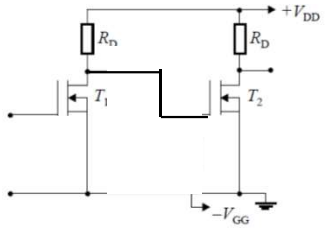


Za one koji žele da nauče više

Direktna sprega - primena u IC

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).



Direktna sprega - primena u IC

Problemi – izazovi

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

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

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.

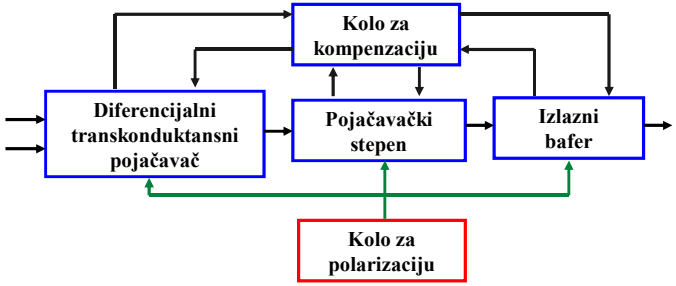
Izvore konstantne struje smo pominjali.

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

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

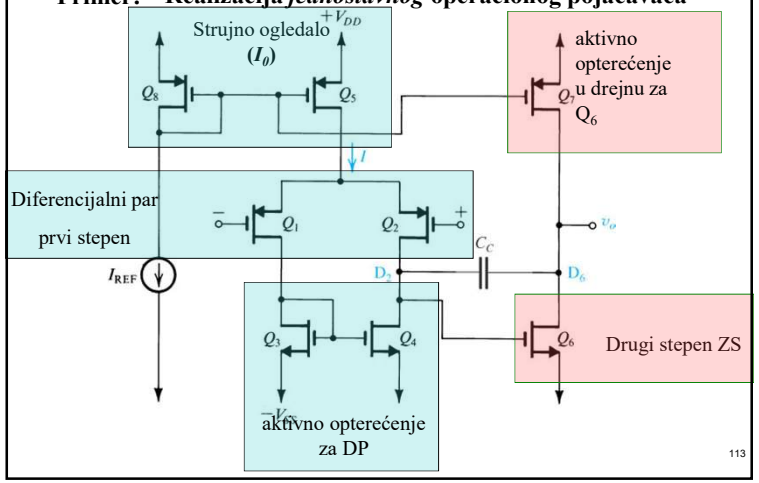
(* Npr. za ZG kod kaskodnih pojačavača)

Blok šema operacionog pojačavača



Direktna sprega

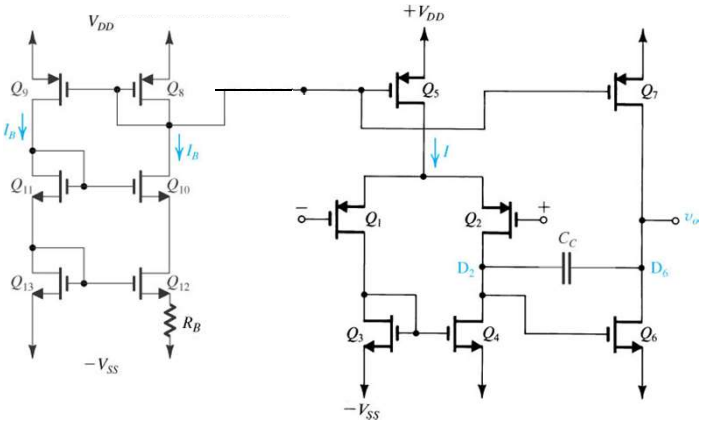
Primer: Realizacija *jednostavnog* operacionog pojačavača



113

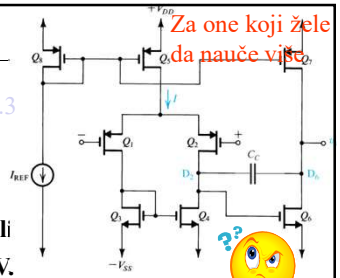
Direktna sprega

Primer realizacije operacionog pojačavača



29. novembar 2018. Višestepeni pojačavači 114

Domaći 8.3: **Realizacija sa MOST**



Za one koji žele da nauče više

E7.3

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa $\mu_n C_{ox}$=160μA/V², V_{tn}=0.7V, $\mu_p C_{ox}$=40μA/V², V_{tp}=-0.8V, V_{An}= -V_{Ap} =-10V.

Dimenzije tranzistora date su u tabeli

Poznato je I_{REF}=90μA, V_{DD}=V_{SS}=2.5V.

Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

Sugestija: Najpre odrediti pojačanje svakog stepena posebno.

	Q_1	Q_1	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)								

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

Šta smo naučili?

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

Na web adresi http://leda.elfak .ni.ac.rs

> EDUCATION > ELEKTRONIKA

slajdovi u pdf formatu

29. novembar 2018. Jednostepeni MOSFET pojačavači 116



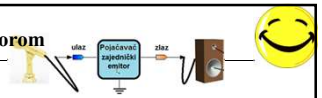
Ispitna pitanja?

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

Sledećeg časa

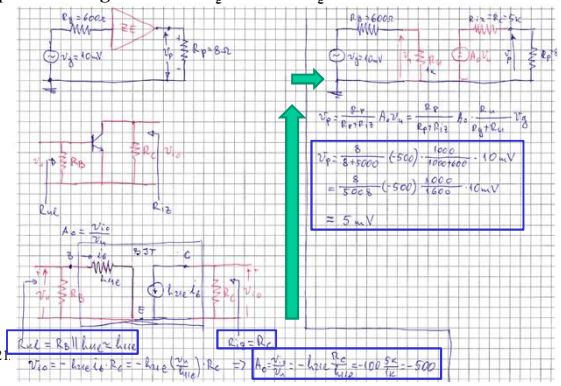
Pojačavači sa negativnom povratnom spregom

2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

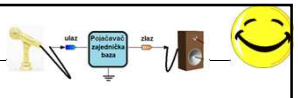


Rešenje Domaći 7.1:

Izračunati napon na potrošaču od R_p=8Ω 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=600Ω .

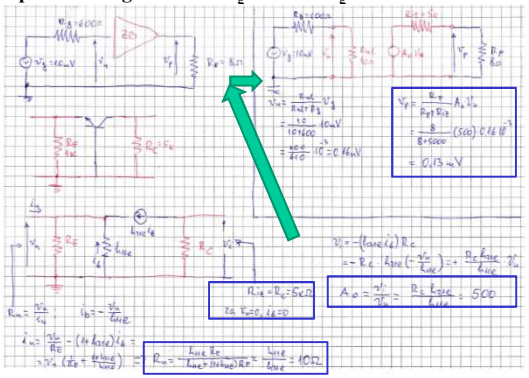


3. Pojačavač sa zajedničkom bazom



Rešenje Domaći 7.2:

Izračunati napon na potrošaču od R_p=8Ω 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=600Ω .

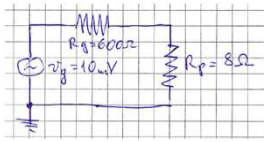


4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rešenje domaći 7.3:

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

a) Direktno;



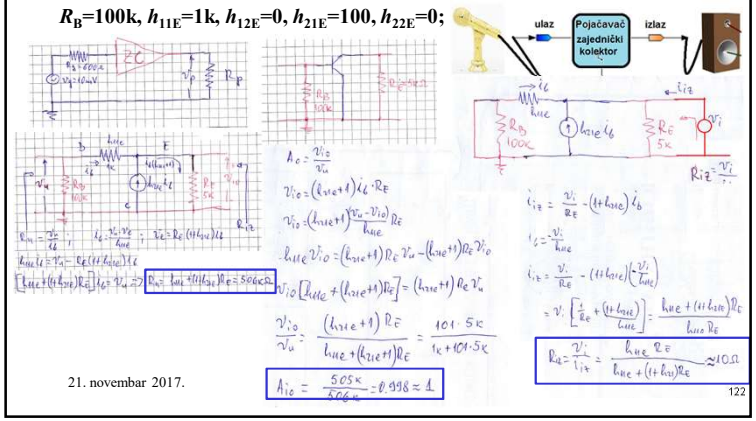
$$V_p = \frac{R_p}{R_p + R_g} V_g = \frac{8}{8+600} \cdot 10\,mV$$

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

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

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

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



$$\frac{V_{io}}{V_u} = \frac{(h_{21E}+1)R_E}{h_{11E}+(h_{21E}+1)R_E} = \frac{101 \cdot 5k}{1k+101 \cdot 5k}$$

$$A_{ic} = \frac{505k}{506k} = 0{,}998 \approx 1$$

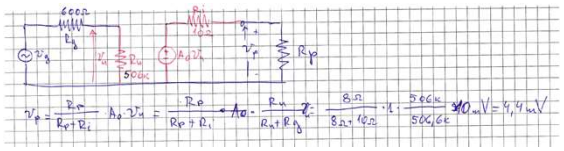
$$R_{iz} = \frac{V_i}{i_{iz}} = \frac{h_{11E}+(1+h_{21E})R_E}{h_{11E}+(1+h_{21E})R_E} \approx 10\,\Omega$$

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

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

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



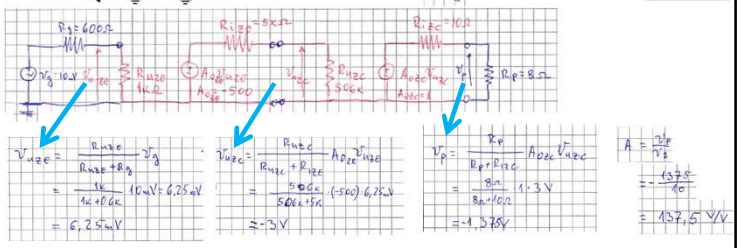


4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

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

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

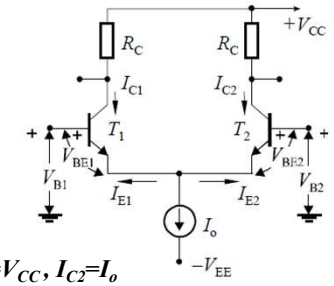




Statička prenosna karakteristika sa BJT Za one koji žele da nauče više

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:

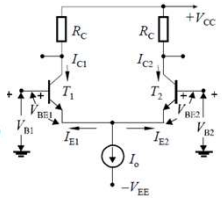
V_{BE1} malo, T1 zakočen $\rightarrow V_{CE1}=V_{CC}$, $I_{C2}=I_o$

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

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

Statička prenosna karakteristika BJT Za one koji žele da nauče više

Raspon (dinamika) izlaznog signala



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

$$(V_{iz})_{min} = (V_{C1} - V_{C2})_{min} = (V_{CC} - R_C I_0) - V_{CC} = -R_C I_o$$

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

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

Za one koji žele da nauče više

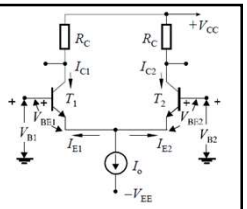
Statička prenosna karakteristika BJT

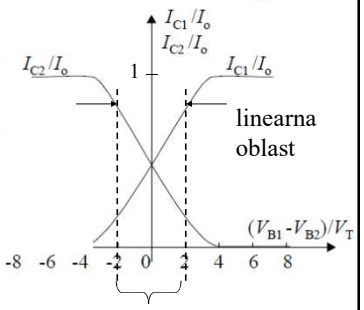
Raspon (dinamika) ulaznog signala?

$$I_{E1} + I_{E2} = -I_o$$
$$V_{B1} - V_{B2} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

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

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



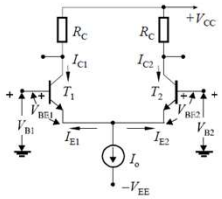


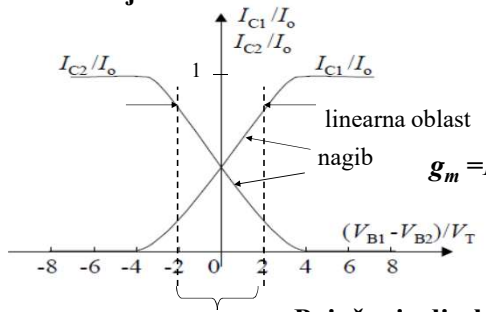
$\Delta V_u = 4V_T \approx 100\text{mV}$

Za one koji žele da nauče više

Statička prenosna karakteristika BJT

Strujna





$g_m = I_o/4V_T$

$\Delta V_u = 4V_T \approx 100\text{mV}$

Pojačanje direktno zavisi od struje I_o

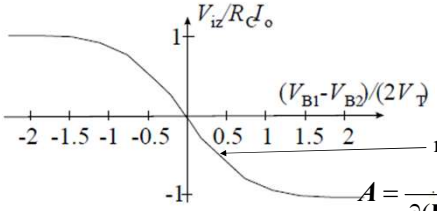
Veće I_o, veće pojačanje

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

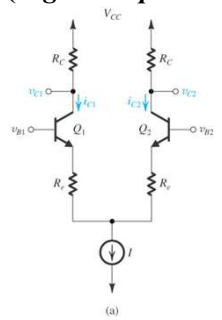
$$A = \frac{\partial V_{iz}}{\partial (V_{B1} - V_{B2})}\bigg|_{V_{B1} = V_{B2}}$$

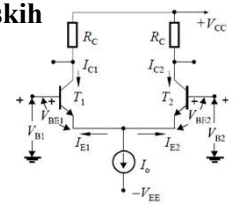
$$A = 2R_C \left(\frac{I_o}{4V_T} \right) = -2R_C \cdot g_{md}$$

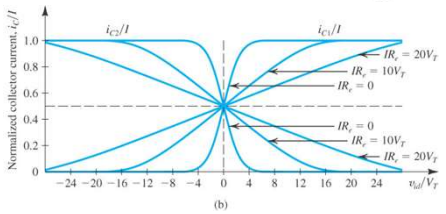
Statička prenosna karakteristika BJT

Za one koji žele da nauče više

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





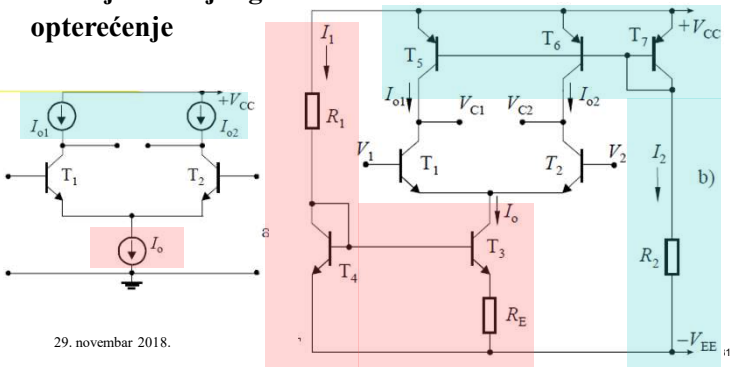


Diferencijalni pojačavači

Poboljšanje performansi

Veće pojačanje zahteva veće R_C (R_D)

Rešenje – strujni generatori kao dinamičko opterećenje

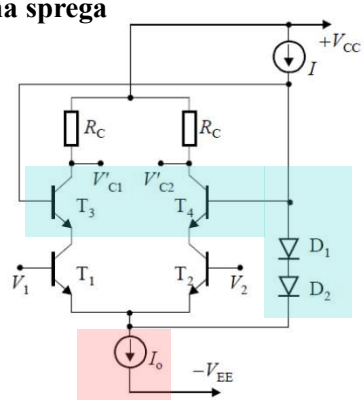


Poboljšanje performansi

Za one koji žele da nauče više

Veće pojačanje – bolji osnovni pojačavači

Rešenje – kaskodna sprega



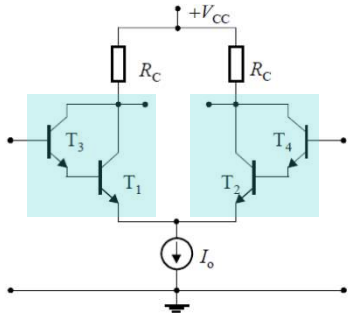
Poboljšanje performansi

Za one koji žele da nauče više

Veće pojačanje – tranzistori sa većim β

Veća ulazna otpornost

Rešenje – Darlingtonov par



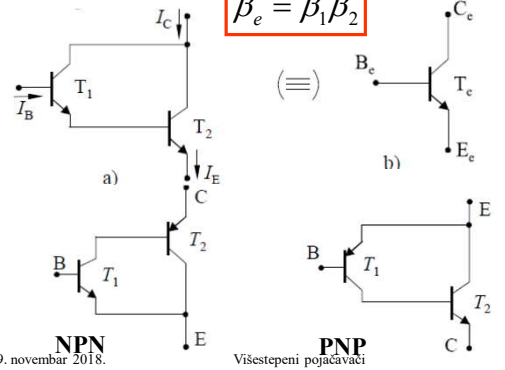
Direktna sprega

Za one koji žele da nauče više

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

Darlingtonova sprega

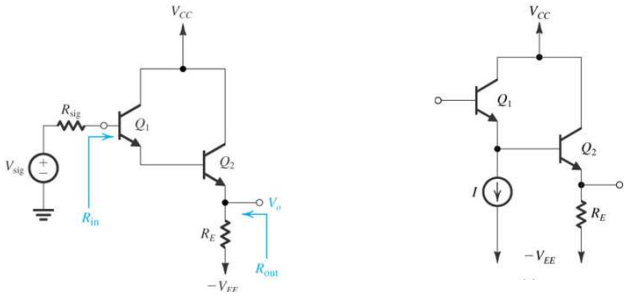
$$\beta_e = \beta_1 \beta_2$$



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**

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.

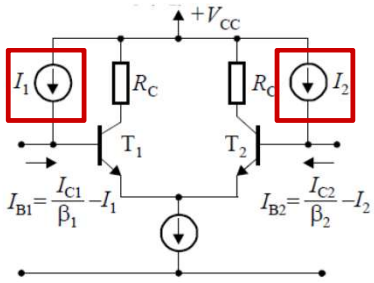
I zbog toga je potrebno da I_B budu male (znači: R_u veliko, tranzistori sa velikim β)

I_{OS} zavisi od temperature

Strujna razdešenost - ofset

Za one koji žele da nauče više

Kompenzacija strujnog ofseta



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