

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: Izadite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

24. novembar 2016.

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

1

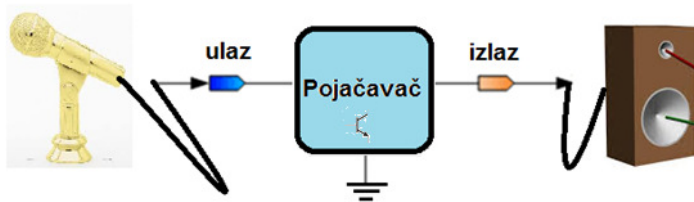
1

Jednostepeni pojačavači sa BJT

2

Osnovi elektronike

Kako se BJT koristi kao pojačavač?



24. novembar 2016.

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

3

3

Osnovne osobine MOS tranzistora

Sadržaj:

1. Uvod

Poređenje MOSFET – BJT

2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

3. Pojačavač sa zajedničkom bazom

4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

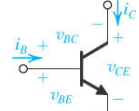
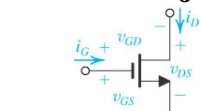
24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

4

Poređenje MOSFET – BJT:

karakteristike

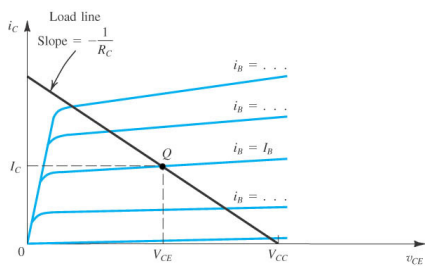
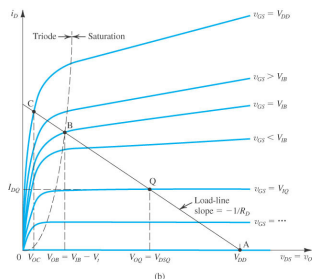


$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right) = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A}\right)$$

$$i_G = 0$$

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$i_B = i_C / \beta$$



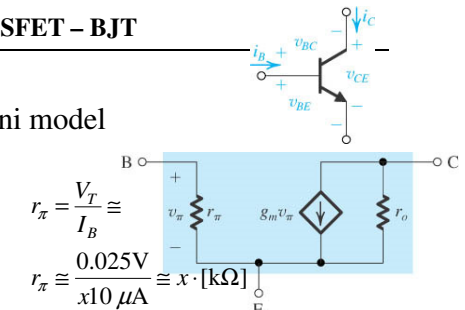
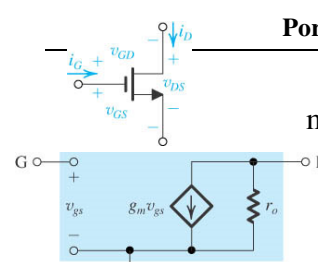
24. novobar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

5

Poređenje MOSFET – BJT

malosignalni model



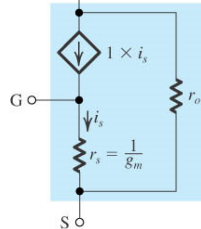
$$g_m = \frac{I_D}{\frac{1}{2}(v_{GS} - V_T)} \approx \frac{x \text{ mA}}{0.1 \text{ V}} \approx x \cdot 10 [\text{mA/V}]$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} \approx \frac{0.025 \text{ V}}{x \cdot 10 \mu\text{A}} \approx x \cdot [\text{k}\Omega]$$

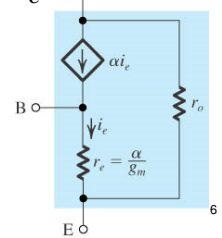
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \approx \frac{x \text{ mA}}{0.025 \text{ V}} \approx x \cdot 40 [\text{mA/V}]$$

$$10 \text{ k}\Omega < r_o = \frac{V_A}{I_D} \approx \frac{75 \text{ V}}{I_D} < 1 \text{ M}\Omega$$

$$10 \text{ k}\Omega < r_o = \frac{V_A}{I_C} \approx \frac{100 \text{ V}}{I_C} < 1 \text{ M}\Omega$$



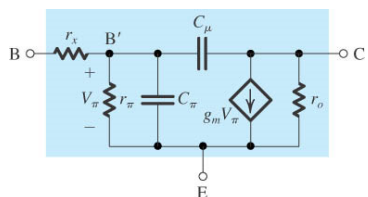
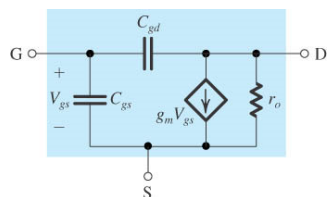
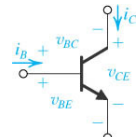
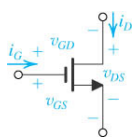
Jednostepeni MOSFET pojačavači



6

Poređenje MOSFET – BJT

VF



$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \approx x \cdot 10 [\text{GHz}]$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)} \approx x \cdot 10 [\text{GHz}] < f_{TMOS}$$

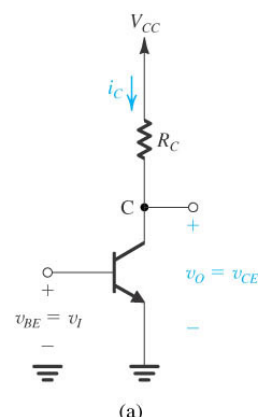
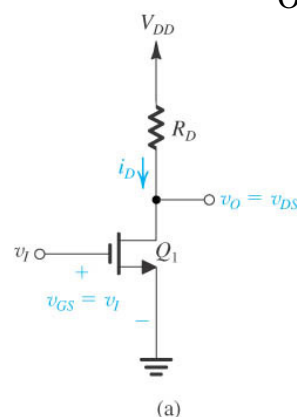
24. novobar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

7

Poređenje MOSFET – BJT

Osnovna konfiguracija

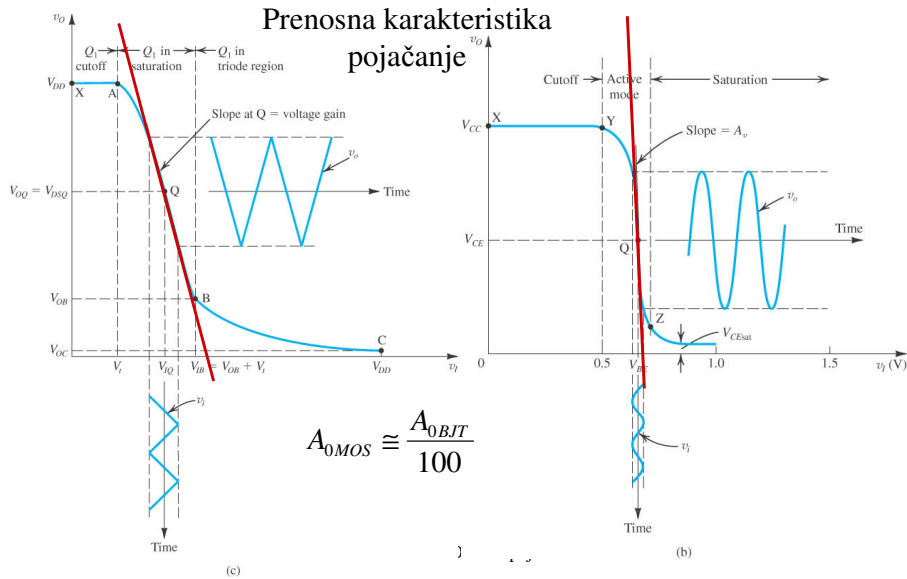


24. novobar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

8

Poređenje MOSFET – BJT



9

Sadržaj

Važi za sve konfiguracije :

1. Princip rada - Tranzistor u **AKTIVNOM REŽIMU**
2. DC polarizacija – obezbeđuje **AKTIVNI REŽIM**
3. Odnosi snaga – troši energiju i u odsustvu signala
4. Stabilnost – na promene T, uzorka tranzistora (β)
5. Analiza za male signale (ravna amplitudska, na SF)
 - Pojačanje neopterećenog pojačavača
 - Ulazna otpornost
 - Izlazna otpornost
 - Ponašanje na niskim frekvencijama, NF
 - Ponašanje na visokim frekvencijama, VF

24. novbar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

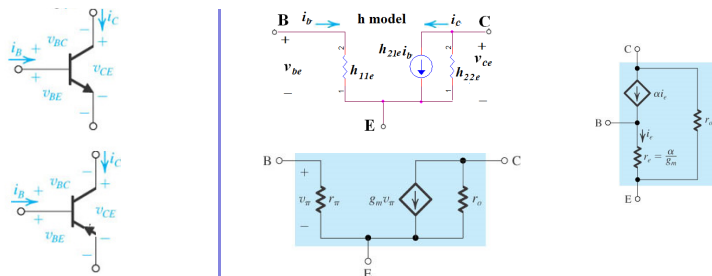
10

Važi za SVE konfiguracije

Postupak AC analize (za male signale):

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

a) Zamenimo sve poluprovodničke komponente dinamičkim modelima



24. novbar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

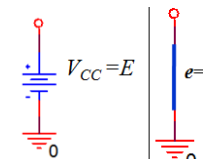
11

Važi za SVE konfiguracije

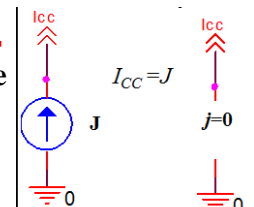
Postupak AC analize (za male signale):

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

b) Kratkospojimo DC izvore konstantnog napona



c) Uklonimo DC izvore konstantne struje



24. novbar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

12

Važi za SVE konfiguracije

Postupak AC analize (za male signale):

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

d) Svi elementi neophodni za DC polarizaciju tranzistora ulaze u kolo pojačavača

B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost

Važi za SVE konfiguracije

Postupak AC analize (za male signale):

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

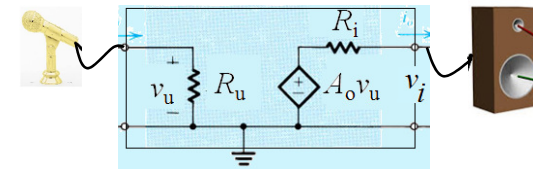
B) Odredimo iz ekvivalentne šeme pojačavača

Naponsko pojačanje

Ulaznu otpornost

Izlaznu otpornost

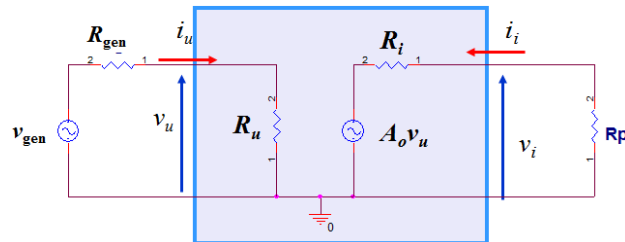
C) Pojačavač u kolu zamenimo modelom



Analiza za male signam

D) Odredimo ukupno pojačanje

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



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

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

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

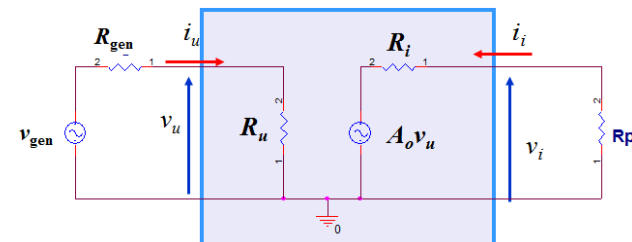
$$\frac{v_u}{v_{gen}} = \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

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

Analiza za male signam

Odredimo ukupno pojačanje

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



Analiza se nastavlja zamenom izraza za A_0 , R_u i R_i za svaku konkretnu konfiguraciju: ZE, ZB, ZC

1. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

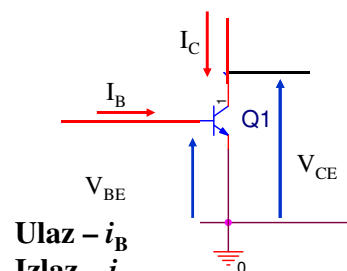
1. Princip rada
2. DC polarizacija
3. Odnosi snaga
4. Stabilnost
5. Analiza za male signale
 - i. Pojačanje neopterećenog pojačavača
 - ii. Ulazna otpornost
 - iii. Izlazna otpornost
 - iv. Analiza u frekvencijskom domenu

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZE
 - Ulaz – i_B
 - Izlaz – i_C
 - Faktor strujnog pojačanja $h_{21E} = i_c / i_b$
za $V_{CE} = \text{const.} = V_{CEM}$
- Tranzistor radi u **aktivnom** režimu
- Pojačava male signale (u okolini radne tačke)
- Obrće fazu
- Suštinski - pojačavač struje (strujno pojačanje ne zavisi od R_p)

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZE

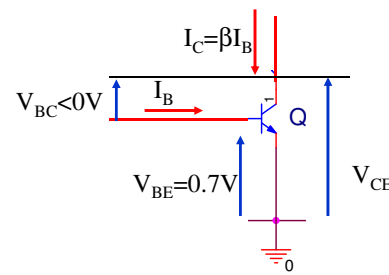


Ulaz – i_B
Izlaz – i_C

Faktor strujnog pojačanja $h_{21E} = i_c / i_b \approx 100$
za $V_{CE} = \text{const.} = V_{CEM}$

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u aktivnom režimu
 - BE spoj direktno polarisan (za NPN $V_B > V_E + V_\gamma$;
 $V_B - V_E = V_{BE} \approx 0.7V$)
 - BC spoj inverzno polarisan (za NPN $V_B < V_C + V_\gamma = V_C + 0.5V$)
 $V_B = V_E + 0.7 < V_C + 0.5V \Rightarrow V_C - V_E = V_{CE} > 0.2V$)

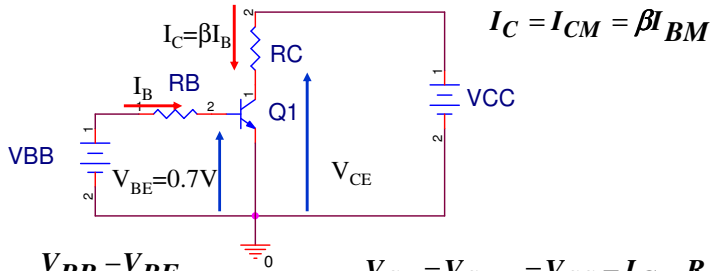


Neophodna
pretpolarizacija –
jednosmerna (mirna)
radna tačka

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u aktivnom režimu



$$I_B = I_{BM} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CEM} = V_{CC} - I_{CM} R_C$$

Da li obrće fazu? ???

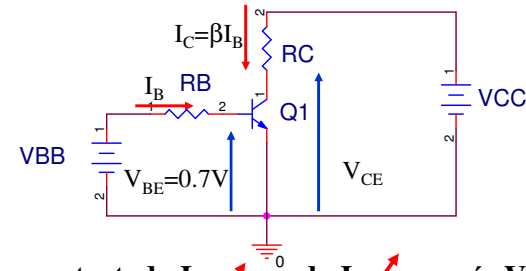


Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u aktivnom režimu

Da li obrće fazu? ???



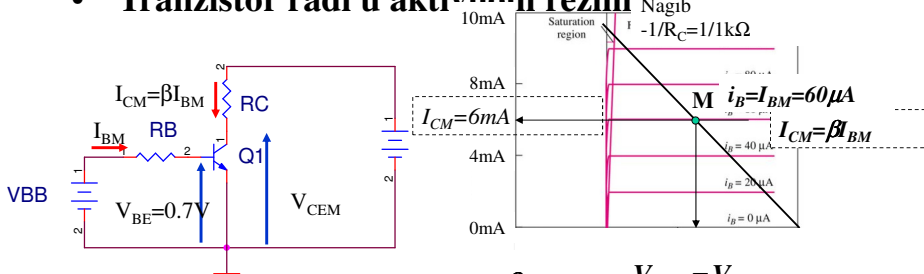
Ako V_{BE} raste, tada I_B , onda I_C , pa će V_{CE} da zato što je

$$V_{CE} = V_{CEM} = V_{CC} - I_{CM} R_C$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u aktivnom režimu



$$I_B = I_{BM} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = I_{CM} = \beta I_{BM} \quad V_{CE} = V_{CEM}$$

$$I_C = I_{CM} = \beta I_{BM} \quad V_{CE} = V_{CC} - I_{CM} R_C$$

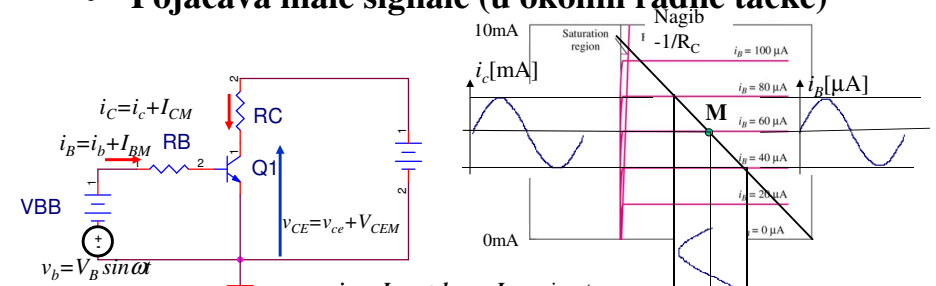
$$I_C = I_{CM} = \beta I_{BM} \quad V_{CE} = V_{CC} - I_{CM} R_C$$

$$I_C = I_{CM} = \beta I_{BM} \quad V_{CE} = V_{CC} - I_{CM} R_C$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:

- Pojačava male signale (u okolini radne tačke)



$$v_b = V_B \sin \alpha$$

$$i_B = I_{BM} + I_{BM} \sin \alpha$$

$$i_B = 60 \mu A + (20 \mu A) \sin \alpha$$

$$i_C = I_{CM} + h_{21E} \cdot I_{BM} \sin \alpha$$

$$i_C = I_{CM} + I_{CM} \sin \alpha$$

$$i_C = 6mA + 100 \cdot (20 \mu A) \sin \alpha$$

$$i_C = 6mA + (2mA) \sin \alpha$$

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$

$$v_{CE} = V_{CC} - I_{CM} R_C - i_C R_C$$

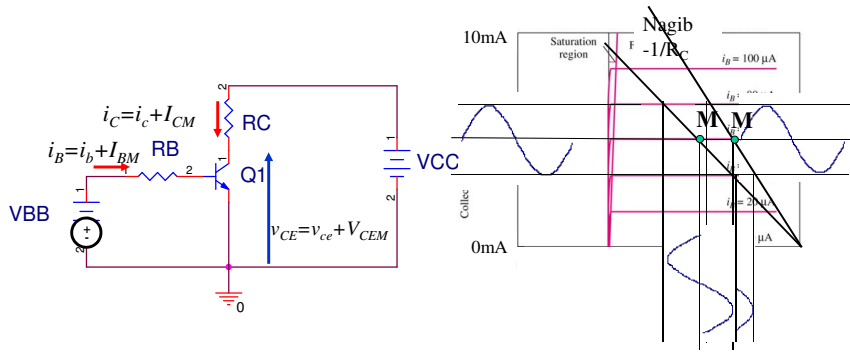
$$v_{CE} = V_{CEM} - i_C R_C$$

$$v_{CE} = 4V - ((2mA) \sin \alpha) \cdot 1k\Omega$$

$$v_{CE} = 4V - (2V) \sin \alpha$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:



v_{CE} zavisi od otpora R_C –nije osobina idealnog pojačavača napona
Strujno pojačanje i_c/i_b ostalo isto, a naponsko pojačanje se smanjilo.

Dakle, radi se suštinski o pojačavaču struje!

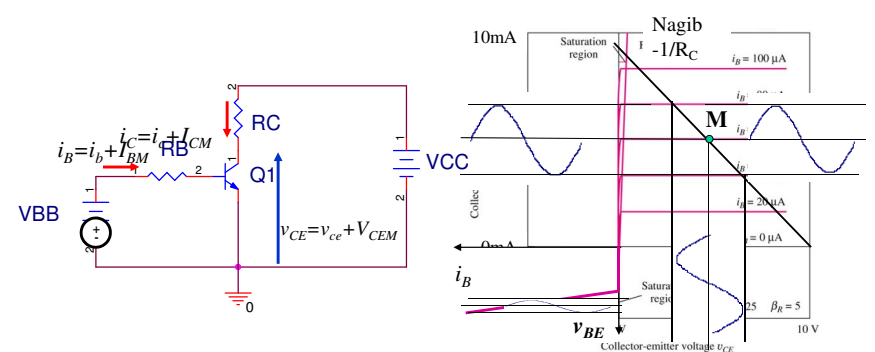
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

25

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:



Pojačanje napona u konkretnom slučaju (1) iznosi

$$A = \left. \frac{v_{ce}}{v_{be}} \right|_{I_B = \text{Const}} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta v_{BE}} = \frac{7V - 4V}{0.76V - 0.73V} = \frac{3V}{0.03V} = 100$$

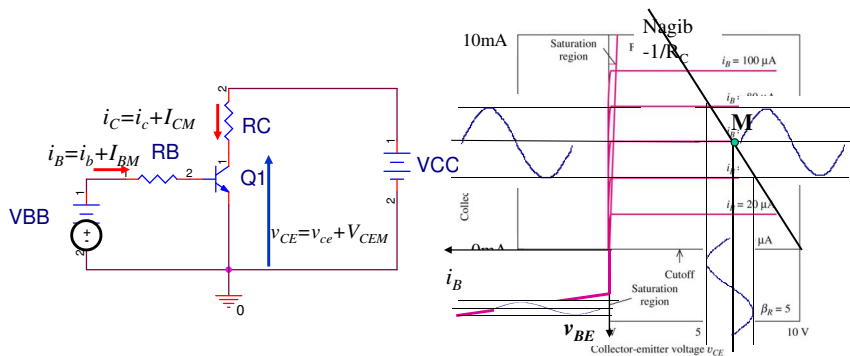
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

26

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

a) Princip rada:



Pojačanje napona u konkretnom slučaju (2) iznosi

$$A = \left. \frac{v_{ce}}{v_{be}} \right|_{I_B = \text{Const}} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta v_{BE}} = \frac{7.4V - 5V}{0.76V - 0.73V} = \frac{2.4V}{0.03V} = 80$$

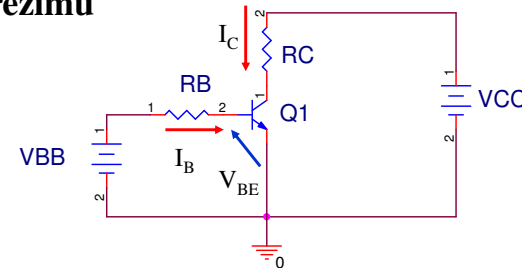
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

27

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

b) DC polarizacija obezbeđuje rad u aktivnom režimu



Napajanje sa dve baterije nije racionalno.
Isti efekat se postiže i sledećom konfiguracijom:

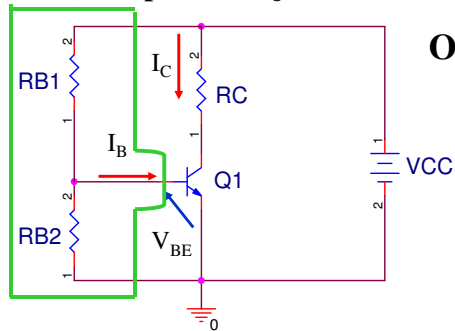
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

28

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

b) DC polarizacija

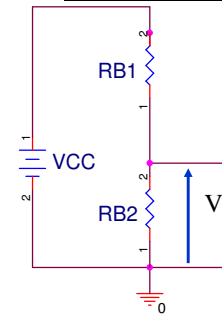


Ovo kolo predstavlja osnovu za praktičnu realizaciju pojačavača sa zajedničkim emitorom

Da bi se uspostavila ekvivalencija sa prethodnom šemom, treba **od baze** prema V_{CC} i masi odrediti parametre ekvivalentnog **Tevenenovog generatora**.

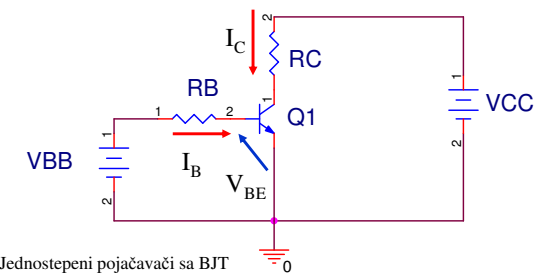
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

b) DC polarizacija



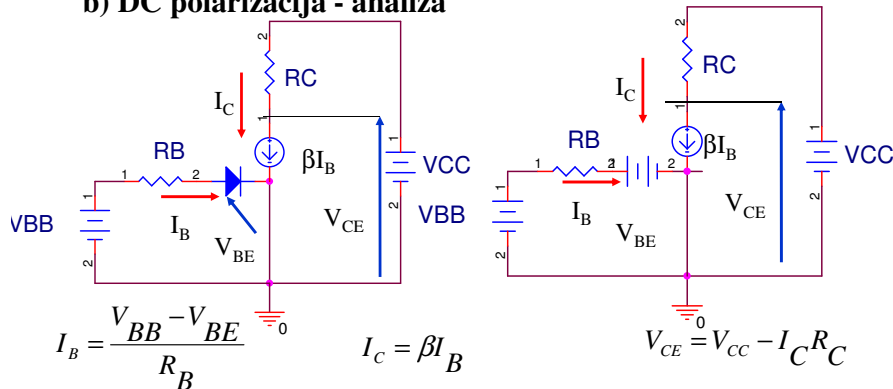
$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

b) DC polarizacija - analiza



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Na kraju treba proveriti da li je BC spoj inverzno polarisan ($V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} < V_\gamma$ za NPN).

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

d) Stabilnost

Nestabilnost dolazi do izražaja usled:

- promena radne temperature
- tolerancija procesa proizvodnje tranzistora
 - β za isti tip tranzistora razlikuje se i više od 100% (npr za BC107b $200 < \beta < 450$)

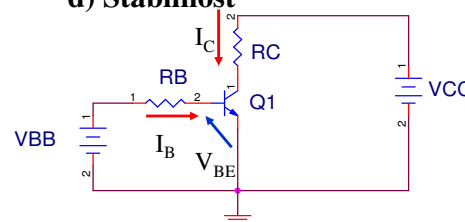
4) Stabilnost

Za BJT **GENERALNO VAŽI**

TEMPERATURNI NESTABILNA KOMPONENTA

- V_{BE} smanjuje se za 2.5 mV pri porastu T za 1 K,
- inverzna struja zasićenja kolektorskog spoja I_{C0} udvostručava se pri porastu T od 10 K;
- koeficijent strujnog pojačanja β raste za 0.7% pri porastu T za 1 K.

d) Stabilnost



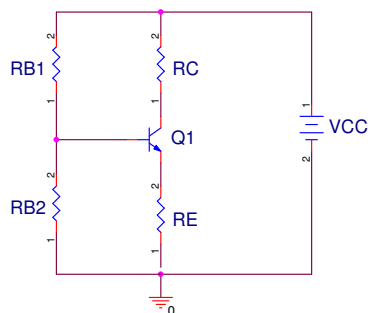
Šta utiče na stabilnost radne tačke?
Od čega zavisi struja kolektora?

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{C0}$$

$$I_C = \beta \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} + (1 + \beta) I_{C0} = \beta \frac{V_{BB}}{R_B} - \beta \frac{V_{BE}}{R_B} + (1 + \beta) I_{C0}$$

I_C zavisi od β , V_{BE} i I_{C0}

d) Stabilnost veća ako postoji R_E

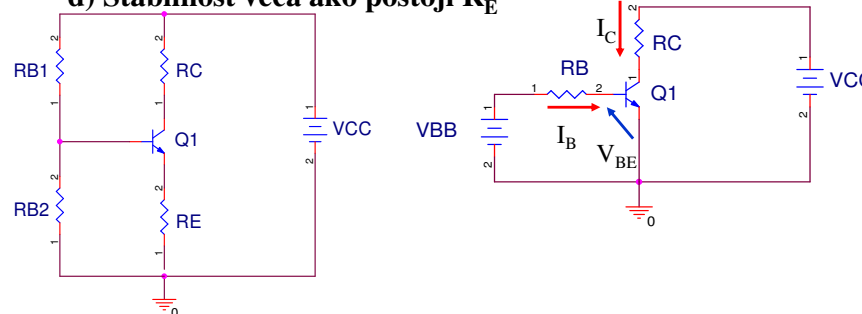


[Ako poraste T] => [I_B raste (zašto?)] =>

[raste I_C i to β puta brže (zašto?)] => [raste V_E (zašto?)]

[V_{BE} se smanjuje (zašto?)] => [I_B se smanjuje (zašto?)]

d) Stabilnost veća ako postoji R_E



Za $\Delta T = 50^\circ C$ => $\Delta I_{C0} = 32 nA$, $\Delta V_{BE} = -0.125 V$, $\Delta \beta = 25$

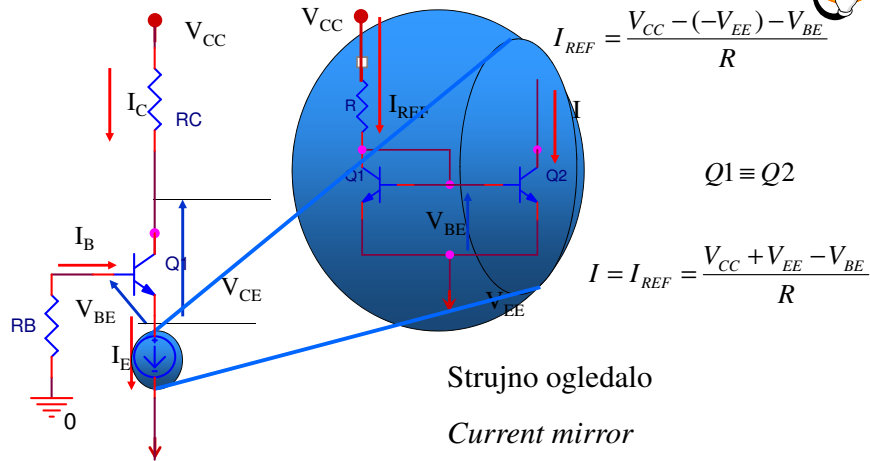
$$\Delta I_C \approx 4 mA$$

$$\Delta I_C \approx 45 mA$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

Za one koji žele
da nauče više

c) Stabilnost – preko izvora konstantne struje
(ima veliku unutrašnju otpornost za AC)

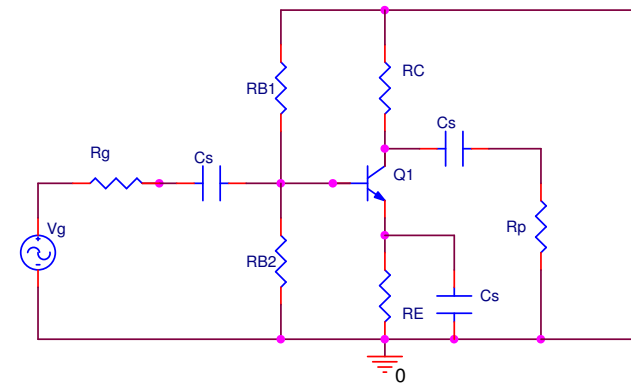


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale
Generatore jednosmernog napona zamenjujemo
unutrašnjom otpornošću (R=0, kratak spoj)

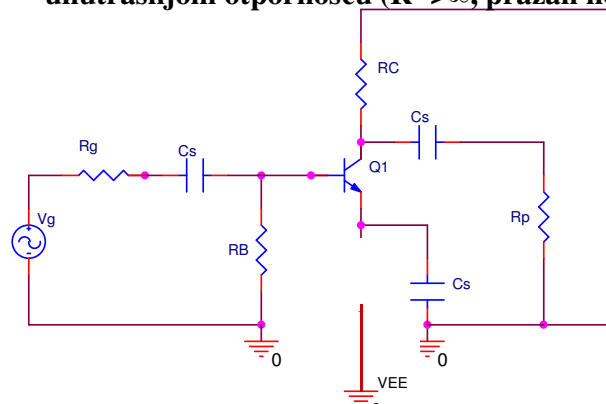
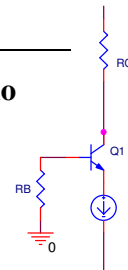


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale - za slučaj polarizacije preko
izvora konstantne struje
Generatore jednosmernih struja zamenjujemo
unutrašnjom otpornošću (R ->∞, prazan hod)

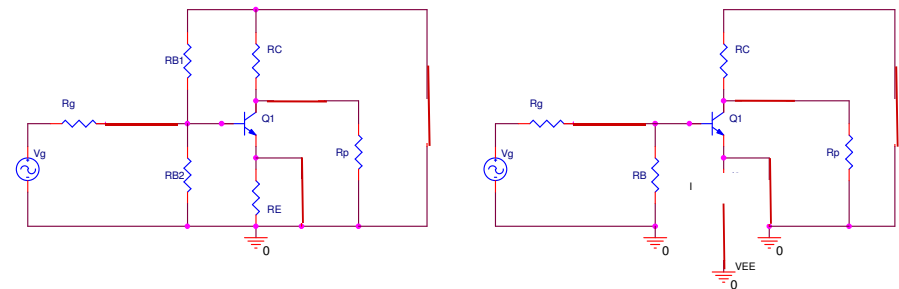


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale
Na ovom nivou analize podrazumevaćemo da, pri
nominalnim frekvencijama, za koje je pojačavač
projektovan, reaktanse svih kondenzatora teže nuli i
ne utiču na osobine pojačavača (kratak spoj).



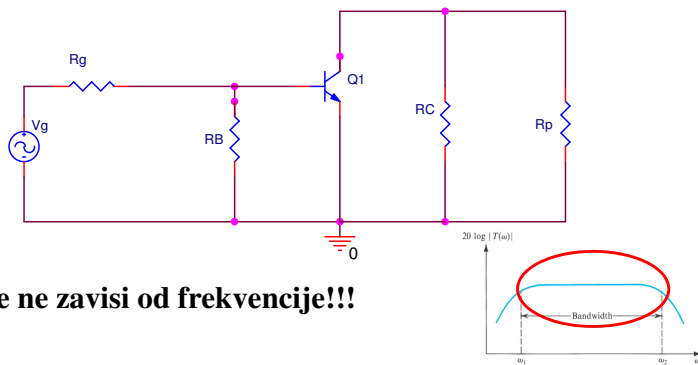
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale

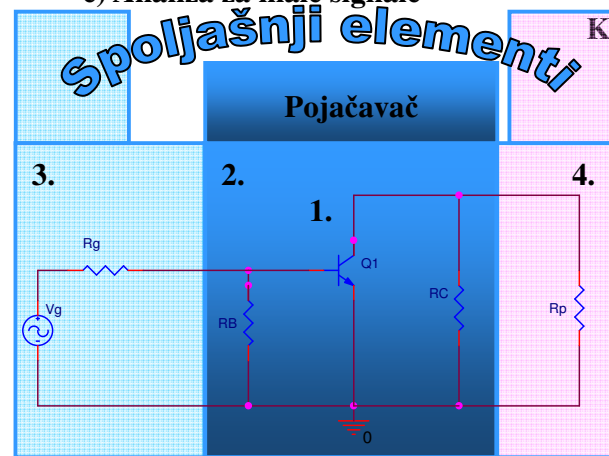
nezavisno od načina polarizacije tranzistora (sa ili bez R_E ili izvor konstantne struje) dobijaju se ekvivalentna kola iste topologije za male naizmenične signale.



Pojačanje ne zavisi od frekvencije!!!

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale

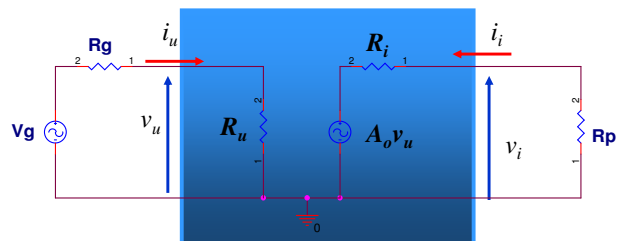


Kolo pojačavača čine:

1. Tranzistor (ZE),
2. Elementi kola za DC polarizaciju,
3. Pobuda -generator,
4. Opterećenje - potrošač

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

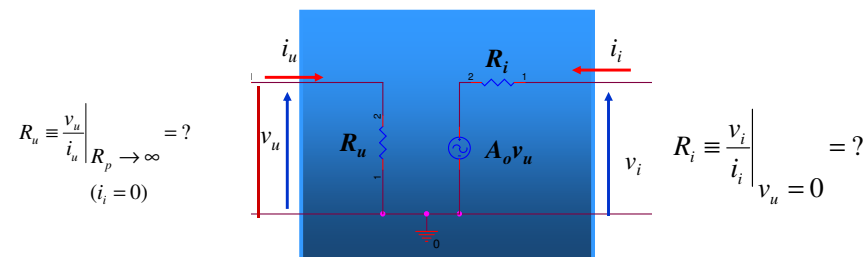
e) Analiza za male signale



Generalizovana šema realnog pojačavača napona (videti prvu nedelju predavanja „Osnovi pojačavačke tehnike 1/2“)

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale



Pojačavač napona

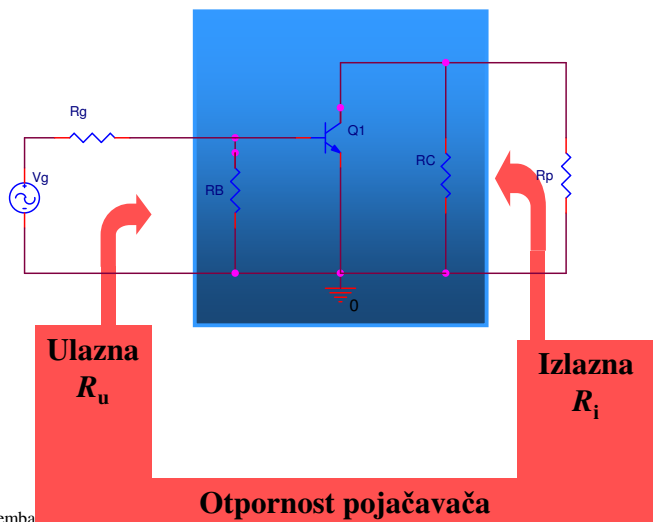
$$R_u \equiv \left. \frac{v_u}{i_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = ? \quad (i_i = 0)$$

$$R_i \equiv \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_u = 0} = ?$$

$$A_o \equiv \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = ?$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale

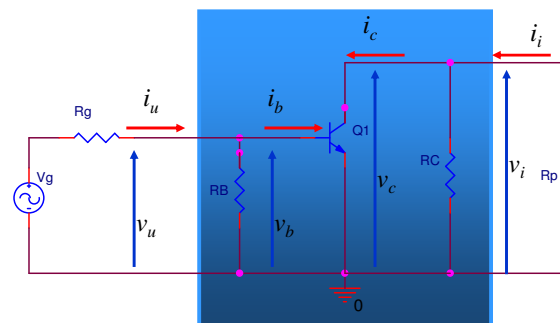


24. novemba

45

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale



Tranzistor zameniti modelom

Videti predavanja iz 5. nedelje „05. Modeli poluprovodnickih komponenta“

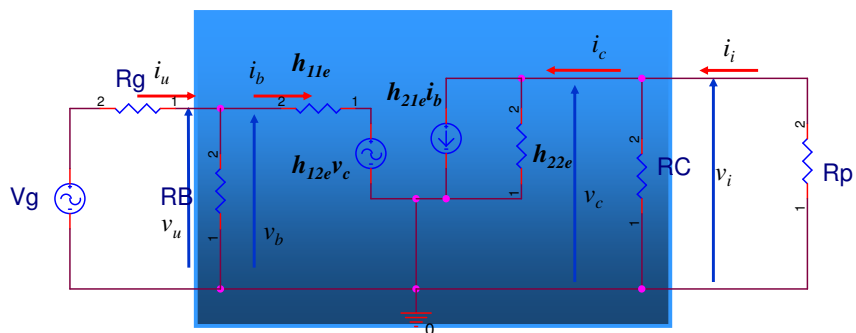
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

46

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale – model sa h-parametrima



Tranzistor zamenjen modelom sa h-parametrima. Vraćićemo se kasnije na kompletne izraze, najpre da analiziramo jednostavniju varijantu.

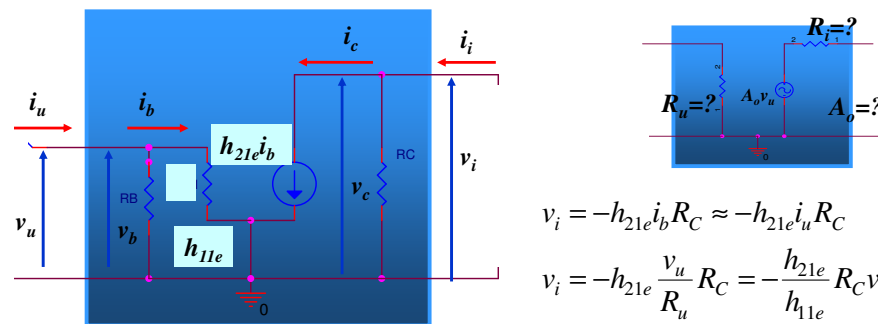
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

47

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

5) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$



$$v_i = -h_{21e} i_b R_C \approx -h_{21e} i_u R_C$$

$$v_i = -h_{21e} \frac{v_u}{R_u} R_C = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C v_u$$

$$A_o = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{i_u = 0} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C$$

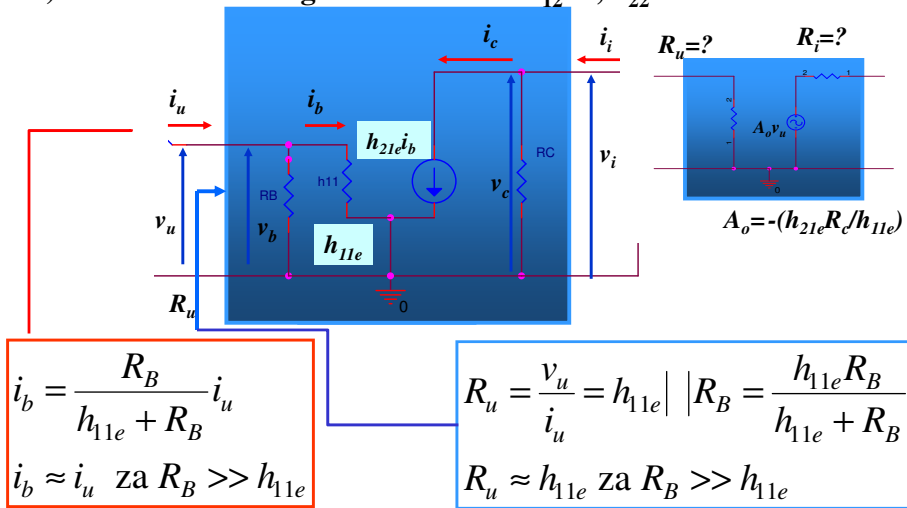
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

48

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

5) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$



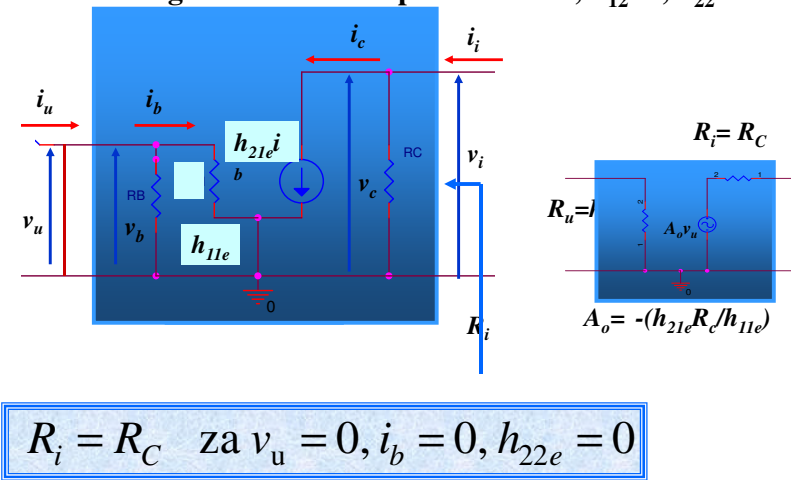
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

49

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

5) Analiza za male signale – zamena h-parametrima; $h_{12}=0, h_{22}=0$



24. novembar 2016.

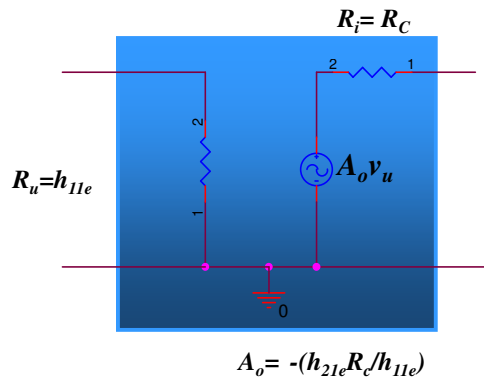
Jednostepeni pojačavači sa BJT

50

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale – zamena h-parametrima; $h_{12}=0, h_{22}=0$

Parametri pojačavača sa zajedničkim emitorom:



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

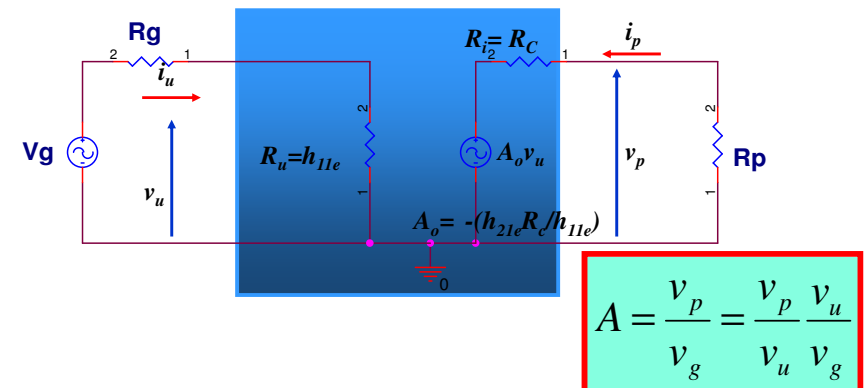
51

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$

Pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora

Videti predavanja „01 Uvod osnovi pojačavacke tehnike 1 od 2“ i primeniti na pojačavač sa ZE



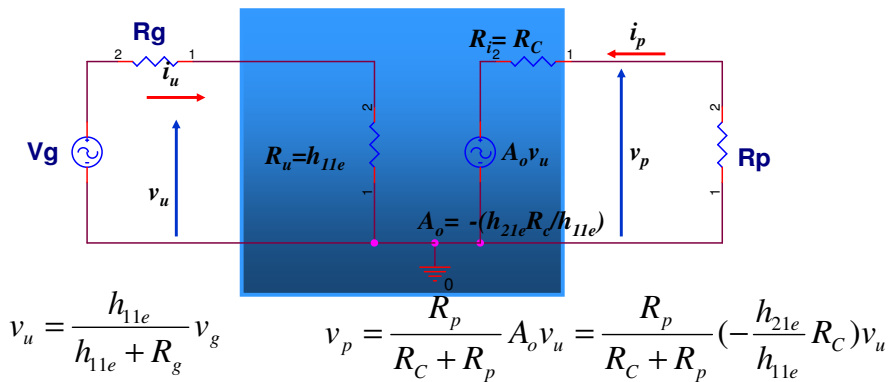
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

52

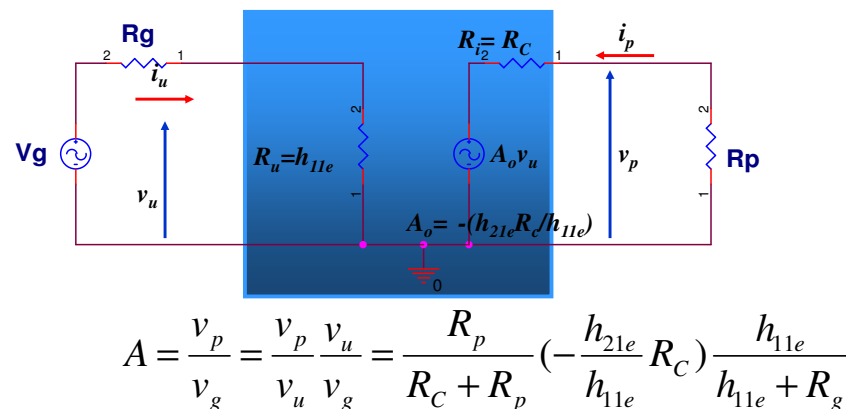
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$
 Pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora



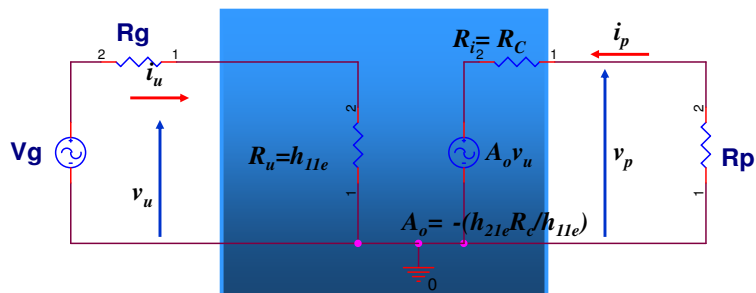
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$
 Pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

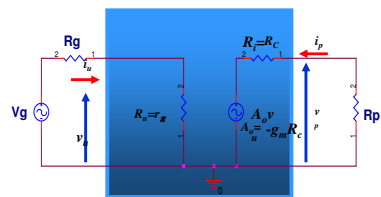
e) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$
 Pojačanje opterećenog pojačavača pobuđenog iz realnog izvora



$$A = \frac{v_p}{v_g} = \frac{v_p}{v_u} \frac{v_u}{v_g} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e} + R_g} \frac{R_p R_C}{R_C + R_p}$$

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale

$$A = -\frac{h_{21e}}{h_{11e} + R_g} \frac{R_C R_p}{R_C + R_p} = -\frac{g_m r_\pi}{r_\pi + R_g} \frac{R_C R_p}{R_C + R_p}$$


$$R_u \cong h_{11e} \cong r_\pi$$

$$R_i \cong R_C$$

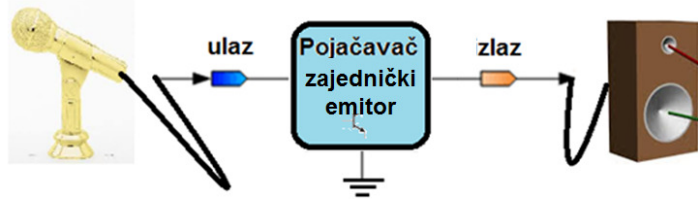
Pojačavačem sa ZE može da se ostvari naponsko pojačanje reda nekoliko stotina.
 Znak „-“ ukazuje da je signal na izlazu suprotne faze od ulaznog
 Usled konačne ulazne otpornosti (reda kΩ) dobro je da se pobuđuju generatorima male izlazne otpornosti.
 Usled konačne izlazne otpornosti (x10kΩ) povoljan je za pobudu potrošača sa što većom otpornošću.

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Domaći 7.1:

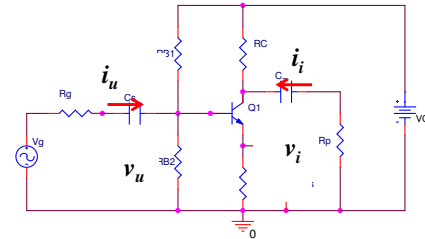
Izračunati napon na potrošaču od $R_p=8\Omega$ pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri: $R_C=5k$, $R_B=100k$, $h_{11E}=1k$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0$, ako je pobuđen iz generatora $V_g=10mV$ i $R_g=600\Omega$.



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale - otpornost u emitoru

Konačna otpornost u emitorskom kolu značajno utiče na osobine pojačavača sa ZE.



$$A_o = \frac{v_i}{v_u} \cong - \frac{h_{21e} R_C}{(h_{11e} + h_{21e} R_E)}$$

$$R_u = \frac{v_u}{i_u} = R_B \parallel R_{ut}; \quad R_{ut} = (h_{11e} + h_{21e} R_E)$$

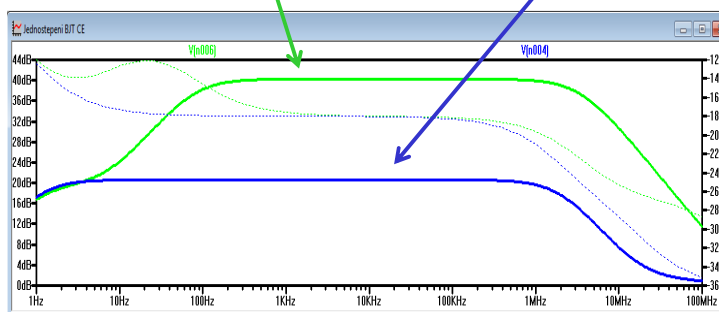
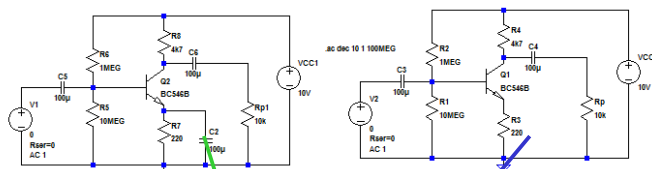
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_C$$

Za $R_E=0$, dobijaju se izrazi za klasični pojačavač sa ZE.

Znači: A_o smanjeno
 R_u povećano
 R_i isto

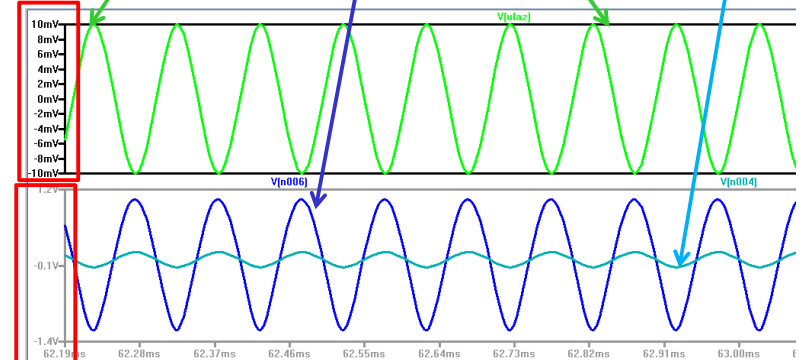
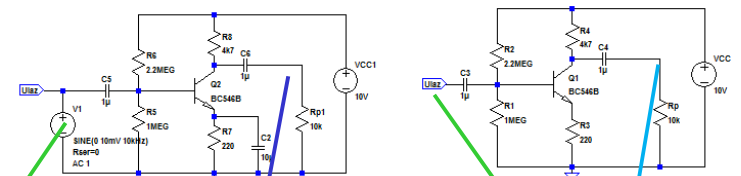
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale - otpornost u emitoru



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

e) Analiza za male signale - otpornost u emitoru



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

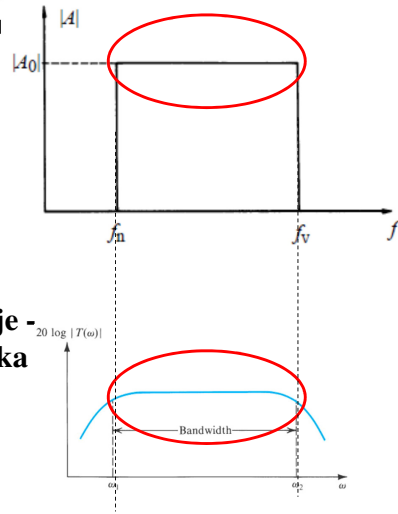
f) Analiza u frekvencijskom domenu

Prethodna analiza:

- Reaktanse svih kondenzatora zanemarene

Rezultat:

- Pojačanje ne zavisi od frekvencije - Ravana amplitudska karakteristika
- Prihvatljivo samo pri nekim frekvencijama – u propusnom opsegu



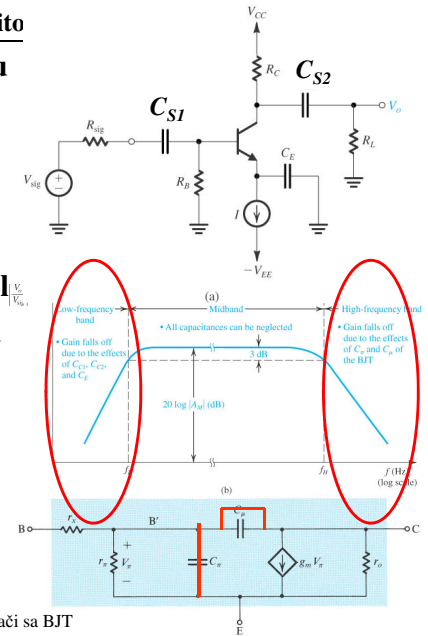
Pojačavač sa zajedničkim emito

f) Analiza u frekvencijskom domenu

Realno kolo:

Reaktanse kondenzatora konačne

- Na NF C_S i C_E predstavljaju konačne impedanse
- C_S blokiraju (oslabe) NF signal
- C_E ponaša se kao impedansa u emitoru – smanjuje pojačanje
- Na VF C_μ i C_π (vidi π model BJT) dolaze do izražaja
- C_μ kratkospaja C i B
- C_π kratkospaja B za E (masu)

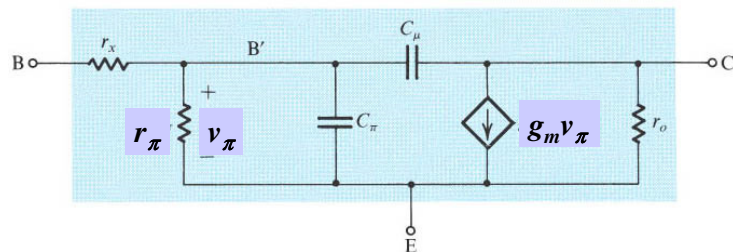
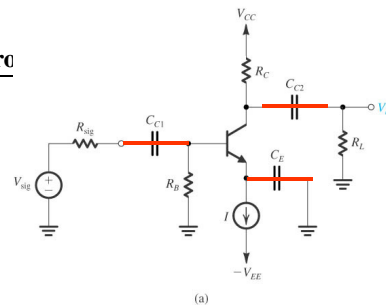


Pojačavač sa zajedničkim emitorom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF – C_{S1} , C_{S2} i C_E predstavljaju kratak spoj

Tranzistor se zamenjuje hibridnim π modelom



Pojačavač sa zajedničkim emitorom

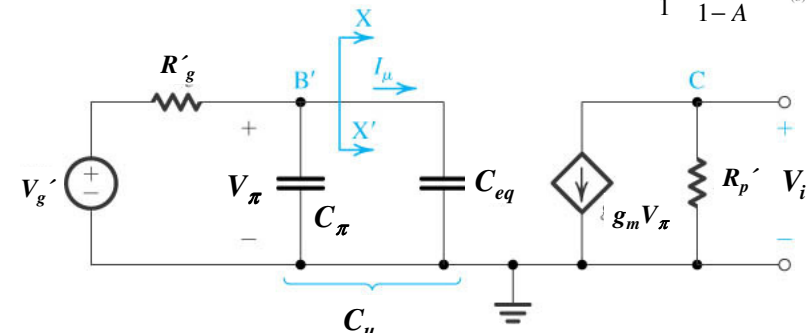
Za one koji žele da nauče više

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF –

Primenom Milerove teoreme, za $A_o = -g_m R_p'$

$$Z_1 = \frac{Z}{1 - A}$$



$$C_u = C_\pi + C_{eq}$$

$$C_u = C_\pi + C_\mu(1 + g_m R_p')$$

(c)

$$V_i = -g_m R_p' V_\pi$$

Za one koji žele
da nauče više

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF -

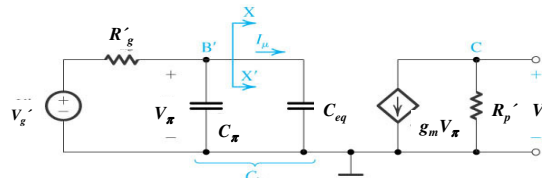
$$V_{\pi} = V_g' \frac{1}{1 + s/\omega_o}$$

$$\omega_o = 1/(C_u R_g')$$

$$V_i = -g_m R_p V_{\pi}$$

$$\frac{V_i}{V_g} = -\frac{R_B}{R_B + R_g} \frac{r_{\pi} g_m R_p'}{r_{\pi} + r_x + R_B \parallel R_g} \frac{1}{1 + s/\omega_o}$$

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



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

65

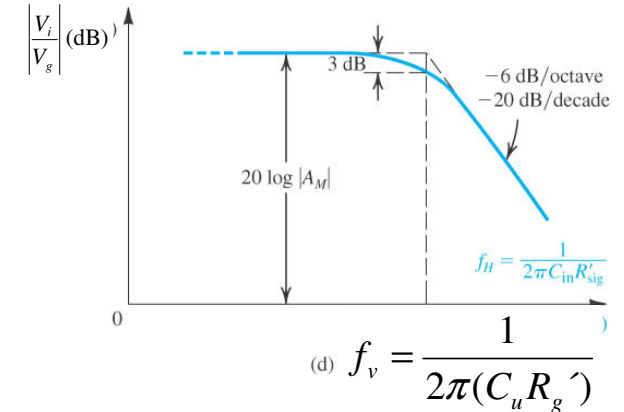
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

f) Analiza u frekvencijskom domenu

VF -

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

$$\omega_v = 1/(C_u R_g')$$



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

66

Za one koji žele
da nauče više

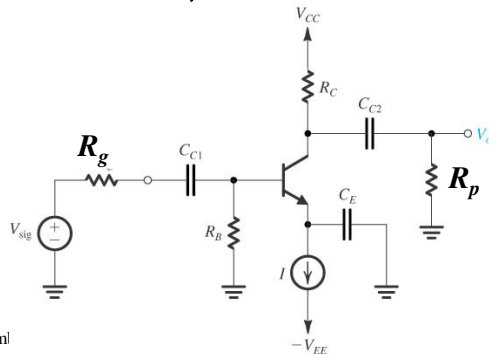
Pojačavač sa zajedničkim emitorom

f) Analiza u frekvencijskom domenu - Primer

Odrediti pojačanje na srednjim frekvencijama kao i gornju

graničnu frekvenciju kola sa slike ako se zna da je

$V_{CC}=V_{EE}=10V$, $I=1mA$, $R_B=100k$, $R_C=8k$, $R_g=5k$, $R_p=5k$,
 $\beta=100$, $V_A=100V$, $C_{\mu}=1pF$, $f_t=800MHz$ i $r_x=50\Omega$.



24. noveml

(a)

67

Za one koji žele
da nauče više

Pojačavač sa zajedničkim emitorom

f) Analiza u frekvencijskom domenu - Rešenje

Za $I_C=I=1mA$, parametri hibridnog modela imaju sledeće

vrednosti:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0.026mV} = 40mA/V$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{40mA/V} = 2.5k$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100V}{1mA} = 100k$$

$$C_{\pi} + C_{\mu} = \frac{g_m}{\omega_f} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 800 \cdot 10^6} = 8pF$$

$$C_{\pi} = (C_{\pi} + C_{\mu}) - C_{\mu} = 7pF$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

68

f) Analiza u frekventijskom domenu - Rešenje

Pojačanje na srednjim frekvencijama je:

$$A = -\frac{R_B}{R_B + R_g} \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + R_B \parallel R_g} g_m R_p' \quad R_p' = r_o \parallel R_c \parallel R_p = 3k$$

$$A = -30V/V$$

Da bi se odredila granična frekvencija, treba naći C_u i R_g'

$$C_u = C_\pi + C_\mu (1 + g_m R_p') = 128pF$$

$$R_g' = r_\pi \parallel [r_x + (R_B \parallel R_g)] = 1.65k$$

$$f_v = \frac{1}{2\pi C_u R_g'} = 754kHz.$$

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: Izadite na kolokvijum
MNOGO JE LAKŠE!**

Sadržaj

1. Pojačavač sa zajedničkim emitorom
2. Pojačavač sa zajedničkom bazom
3. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Pojačavač sa zajedničkom bazom

2. Pojačavač sa zajedničkom bazom

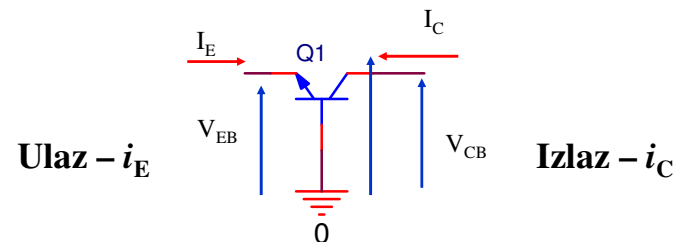
- a. Princip rada
- b. DC polarizacija
- c. Odnosi snaga
- d. Stabilnost
- e. Analiza za male signale
 - i. Pojačanje neopterećenog pojačavača
 - ii. Ulazna otpornost
 - iii. Izlazna otpornost
 - iv. Analiza u frekventijskom domenu

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB
 - Ulaz – i_E , v_{EB} pobuda u emitorskom kolu
 - Izlaz – i_C , v_{CB} potrošač u kolektorskom kolu
- Tranzistor radi u **aktivnom** režimu
- Pojačava male signale (u okolini radne tačke)
- Ne obrće fazu

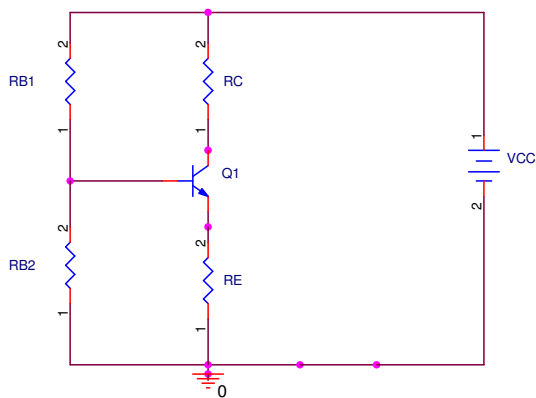
a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB



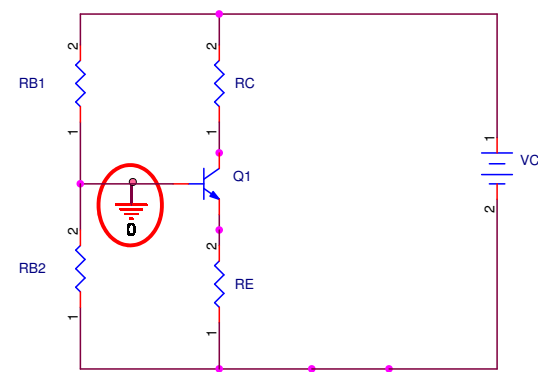
Faktor strujnog pojačanja $h_{21C} = i_c / i_e = \alpha$
za $V_{CB} = \text{const.} = V_{CBM}$

b) DC polarizacija:



b) DC polarizacija:

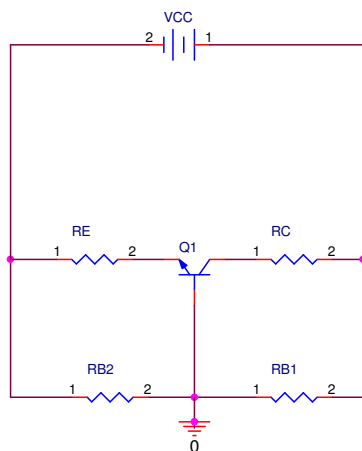
- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB



Pojačavač sa zajedničkom bazom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB



24. novembar 2016.

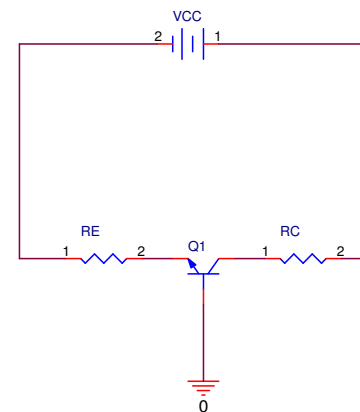
Jednostepeni pojačavači sa BJT

77

Pojačavač sa zajedničkom bazom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB



24. novembar 2016.

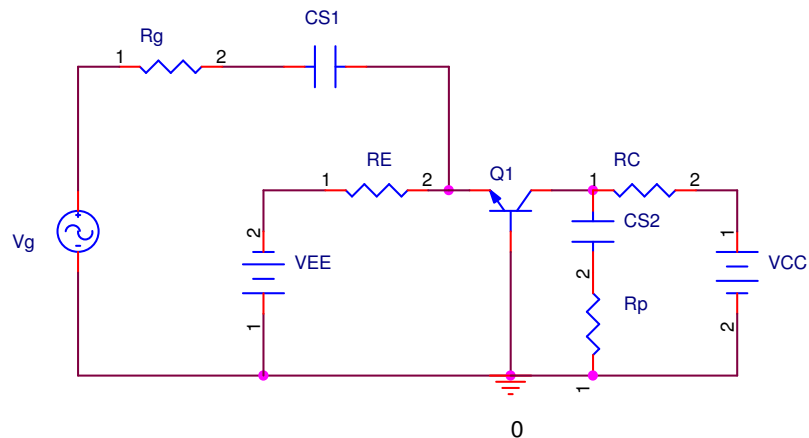
Jednostepeni pojačavači sa BJT

78

Pojačavač sa zajedničkom bazom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZB



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

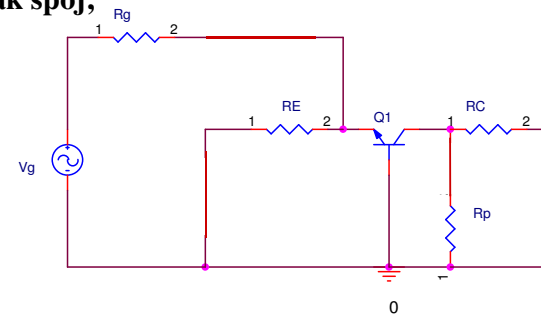
79

Pojačavač sa zajedničkom bazom

c) Analiza za male signale

V_{EE} i V_{CC} kratak spoj;

C_{S1} i C_{S2} kratak spoj;

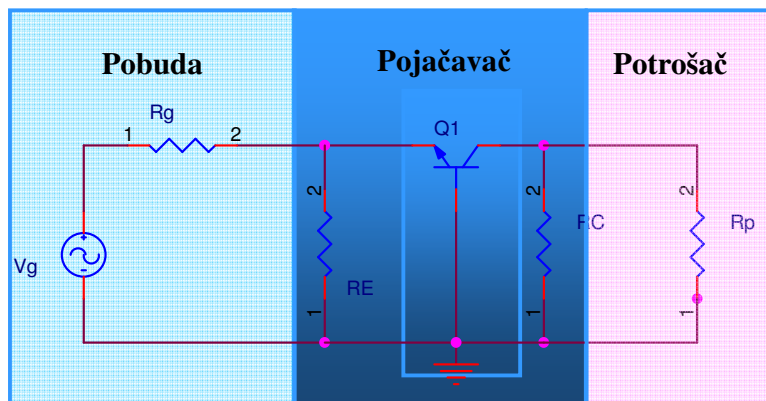


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

80

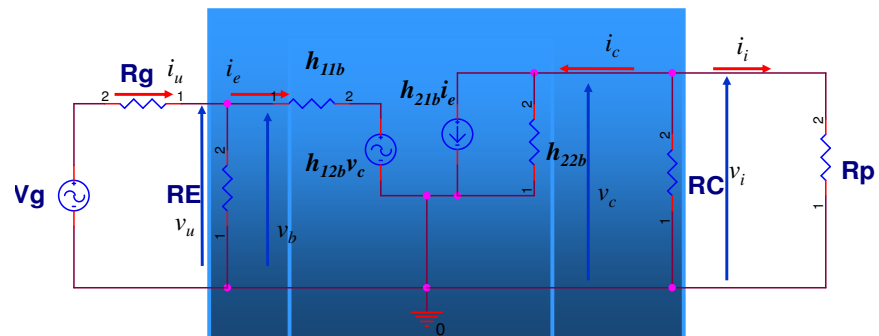
c) Analiza za male signale



Tranzistor zameniti modelom

Videti predavanja iz 4. nedelje „04. Modeli poluprovodničkih komponenta (14)“

e) Analiza za male signale – model sa h -parametrima



Ekvivalentna šema ista kao za ZE, samo su h_e -parametari zamenjeni sa h_b -parametrima i R_E umesto R_B

Hibridni model – h parametri

Relacije između h -parametara konfiguracija ZB sa ZE kada se ima u vidu realna činjenica da je

$$h_{12E} \ll 1, h_{11E} h_{22E} \ll 1, h_{12B} \ll 1, h_{11B} h_{22B} \ll 1, h_{12C} \approx 1$$

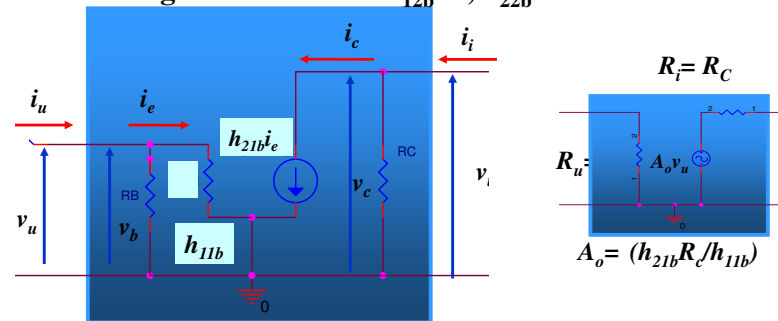
$$h_{11B} \approx \frac{h_{11E}}{1+h_{21E}} \ll h_{11E} \quad h_{11C} = h_{11E} \quad [\Omega = \text{ohm}]$$

$$h_{12B} \approx \frac{h_{11E} h_{22E}}{1+h_{21E}} - h_{12E} \approx 0 \quad h_{12C} = 1 - h_{12E} \approx 1 \quad [\text{V/V}]$$

$$h_{21B} \approx -\frac{h_{21E}}{1+h_{21E}} \approx -1 \quad h_{21C} = -(1+h_{21E}) \approx -h_{21E} \quad [\text{A/A}]$$

$$h_{22B} \approx \frac{h_{22E}}{1+h_{21E}} \approx 0 \quad h_{22C} = h_{22E} \approx 0 \quad [\text{S} = 1/\Omega = \text{mho}]$$

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12b}=0, h_{22b}=0$



$$R_u = \frac{v_u}{i_u} \approx h_{11b} = \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}} \ll h_{11e} \quad A_o = \left. \frac{v_i}{v_u} \right|_{R_p \rightarrow \infty} = -\frac{h_{21b}}{h_{11b}} R_C \approx -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C$$

$$R_{it} = 1/h_{22b} \rightarrow \infty \quad R_i = R_C \quad \text{za } v_u = 0, i_b = 0$$

Pojačavač sa zajedničkom bazom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12}=0, h_{22}=0$

Mala ulazna otpornost

$$R_u = \frac{v_u}{i_u} \approx h_{11b} = \frac{h_{11e}}{1 + h_{21e}}$$

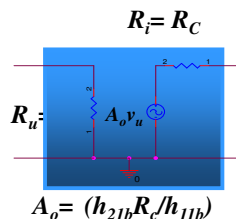
Veliko naponsko pojačanje (kao ZE)

$$A_o \approx \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C$$

NE obrće fazu

Relativno velika izlazna otpornost (kao ZE)

$$R_i = R_C$$

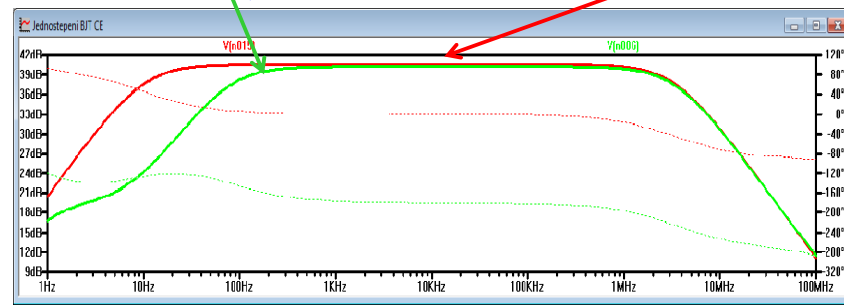
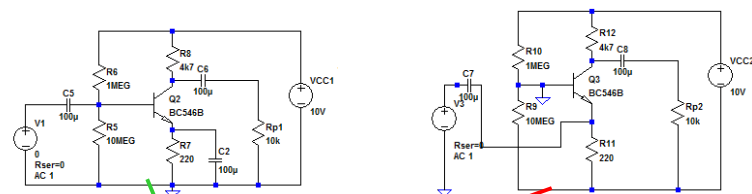


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

85

Pojačavač sa zajedničkom bazom

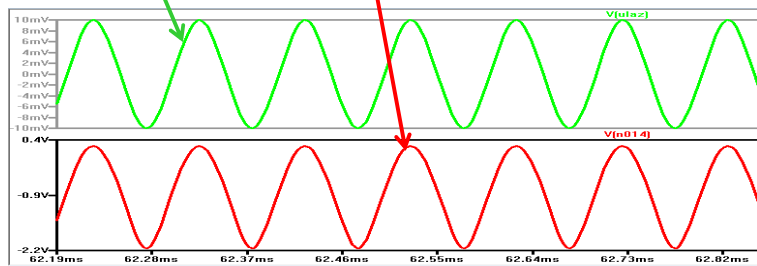
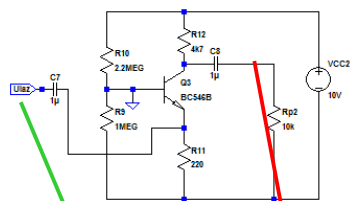


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

86

Pojačavač sa zajedničkom bazom

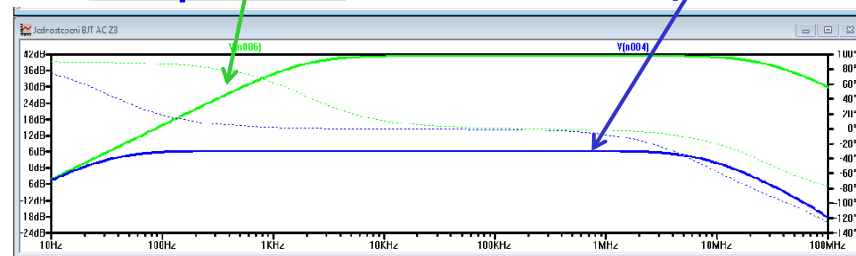
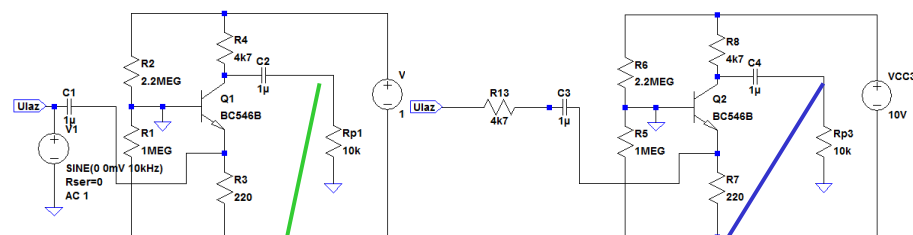


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

87

Pojačavač sa zajedničkom bazom



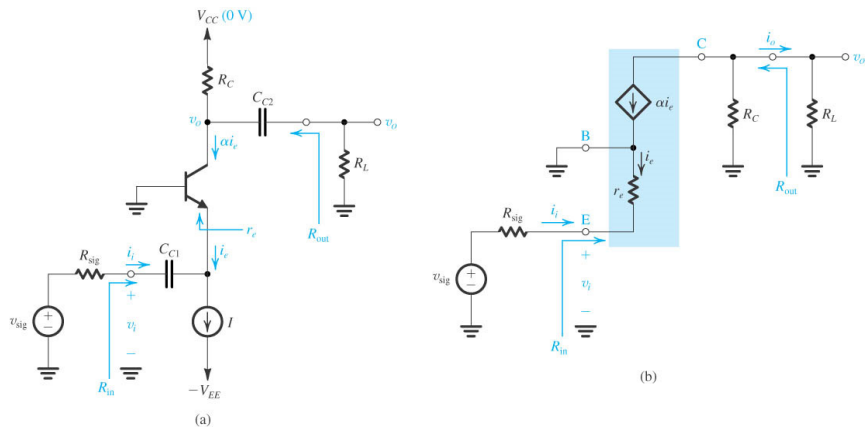
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

88

Pojačavač sa zajedničkom bazom

e) Analiza za male signale –zamena T- modelom



Pojačavač sa zajedničkom bazom

e) Analiza za male signale –zamena T-modelom

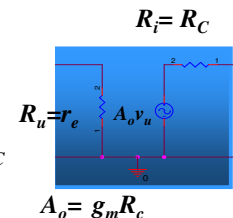
Mala ulazna otpornost $R_u \approx h_{11b} = \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}} = r_e$

Veliko naponsko pojačanje (kao ZE) $A_o \approx \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C = \frac{\alpha}{r_e} R_C = g_m R_C$

NE obrće fazu

Strujno pojačanje ≈ 1 $A_{SS} \approx \frac{\beta}{1+\beta} = \alpha \approx 1$

Relativno velika izlazna otpornost (kao ZE) $R_i = R_C$



Pojačavač sa zajedničkom bazom

Primena: Ograničena zbog veoma male ulazne otpornosti

$$A_u = \frac{v_p}{v_g} = \frac{v_p}{v_u} \frac{v_u}{v_g} = g_m R_C \frac{R_u}{R_u + R_g}$$

Neka je $R_g=2.5k$, $R_C=10k$, $r_e=25\Omega$, $g_m=40mS$, pojačanje neopterećenog je 400, a ukupno:

$$A_u = \frac{v_p}{v_g} (=) \left(40 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3\right) \frac{25}{2525} \approx 4$$

Strujni bafer – jedinično strujno pojačanje – prilagođenje male u veliku izlaznu otpornost.

Sadržaj

1. Pojačavač sa zajedničkim emitorom
2. Pojačavač sa zajedničkom bazom
3. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

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: Izadite na kolokvijum MNOGO JE LAKŠE!

10. novembar 2016.

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

93

93

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

3. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

- Princip rada
- DC polarizacija
- Odnosi snaga
- Stabilnost
- Analiza za male signale
 - Ulazna otpornost
 - Pojačanje
 - Izlazna otpornost
 - Analiza u frekventijskom domenu

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

94

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZC

Ulaz – i_b , v_{BC} pobuda u baznom kolu (B-C)

Izlaz – i_e , v_{EC} potrošač u emitorskom kolu (E-C)

Faktor strujnog pojačanja i_e/i_b

za $v_i=v_{ec}=0$; $V_{EC} = \text{const.} = V_{ECM}$

- Tranzistor radi u **aktivnom** režimu
- Nije unilateralan** $h_{12c} \approx 1$
- Ne obrće fazu
- Pojačanje napona ≈ 1
- Pojačanje struje $\approx 1+\beta$

24. novembar 2016.

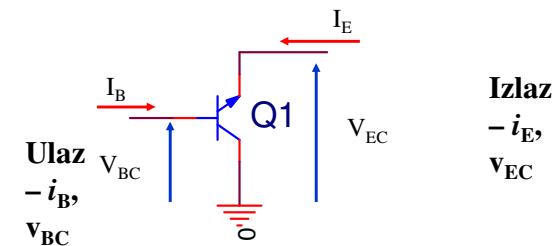
Jednostepeni pojačavači sa BJT

95

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

a) Princip rada:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZC



Faktor strujnog pojačanja $h_{21C} = i_e/i_b = 1+\beta$
za $V_{EC} = \text{const.} = V_{ECM}$

24. novembar 2016.

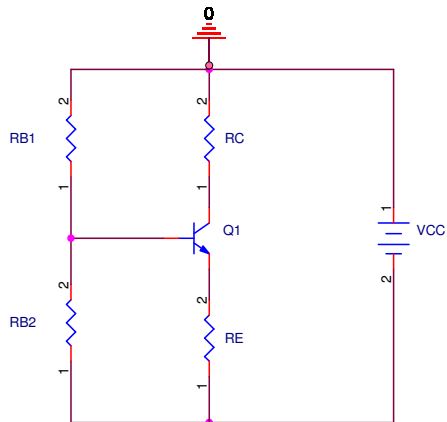
Jednostepeni pojačavači sa BJT

96

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZC



24. novembar 2016.

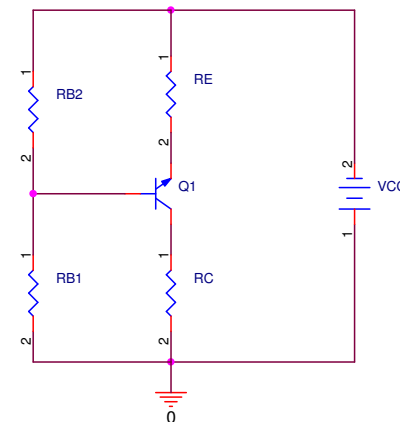
Jednostepeni pojačavači sa BJT

97

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZC



24. novembar 2016.

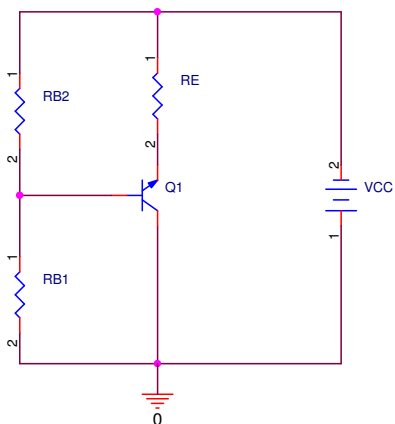
Jednostepeni pojačavači sa BJT

98

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

b) DC polarizacija:

- Tranzistor radi u konfiguraciji ZC



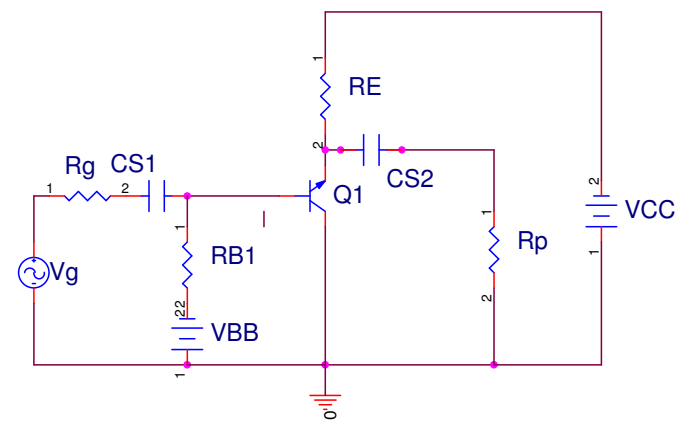
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

99

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

b) DC polarizacija:



24. novembar 2016.

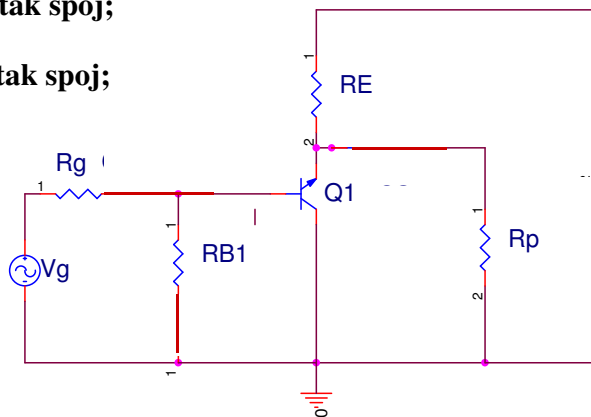
Jednostepeni pojačavači sa BJT

100

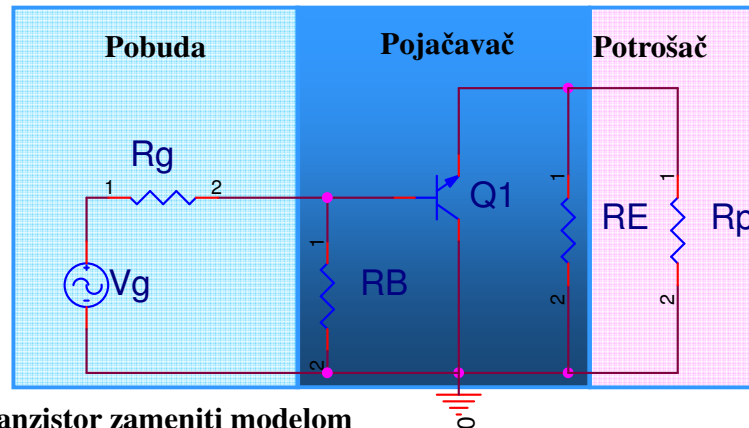
c) Analiza za male signale

V_{EE} i V_{BB} kratak spoj;

C_{S1} i C_{S2} kratak spoj;



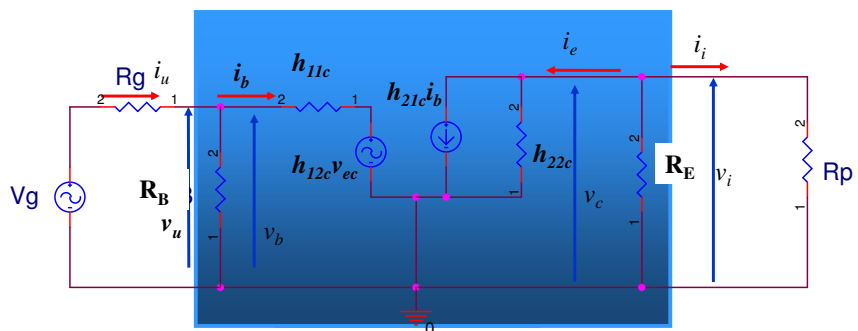
c) Analiza za male signale



Tranzistor zameniti modelom

Videti predavanja iz 4. nedelje „04. Modeli poluprovodničkih komponenta (14)“

e) Analiza za male signale – model sa h -parametrima



Ekvivalentna šema ista kao za ZE, samo su h_e -parametri zamenjeni sa h_c -parametrima; R_E umesto R_C

Hibridni model – h parametri

Relacije između h -parametara konfiguracija ZB sa ZE kada se ima u vidu realna činjenica da je

$$h_{12E} \ll 1, h_{11E} h_{22E} \ll 1, h_{12B} \ll 1, h_{11B} h_{22B} \ll 1, h_{12C} \approx 1$$

$$h_{11B} \approx \frac{h_{11E}}{1 + h_{21E}} \ll h_{11E} \quad h_{11C} = h_{11E} \quad [\Omega = \text{ohm}]$$

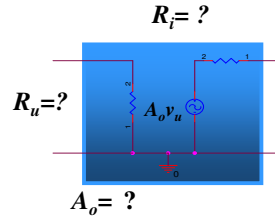
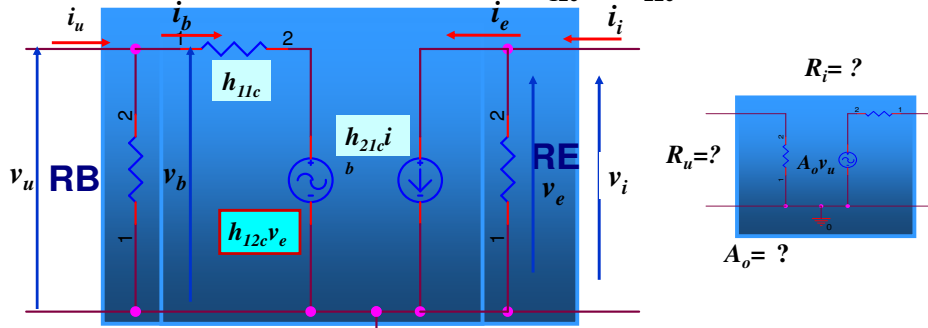
$$h_{12B} \approx \frac{h_{11E} h_{22E}}{1 + h_{21E}} - h_{12E} \approx 0 \quad h_{12C} = 1 - h_{12E} \approx 1 \quad [\text{V/V}]$$

$$h_{21B} \approx -\frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}} \approx -1 \quad h_{21C} = -(1 + h_{21E}) \approx -h_{21E} \quad [\text{A/A}]$$

$$h_{22B} \approx \frac{h_{22E}}{1 + h_{21E}} \approx 0 \quad h_{22C} = h_{22E} \approx 0 \quad [\text{S} = 1/\Omega = \text{mho}]$$

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12c}=1, h_{22c}=0$



$$A_{SS} = \frac{i_e}{i_b} \approx -h_{21c} = 1 + h_{21e}$$

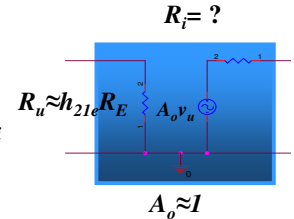
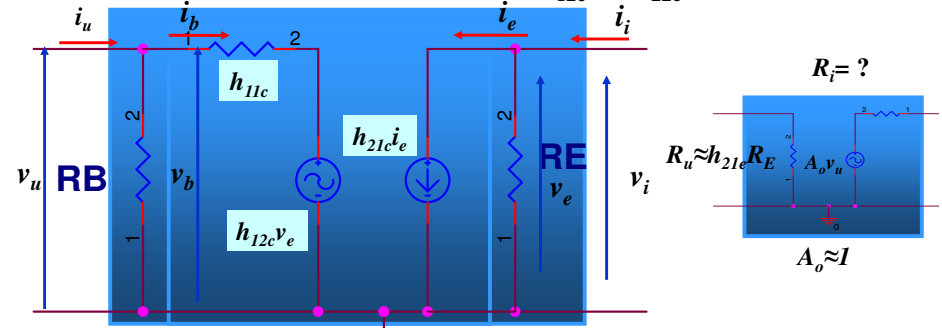
$$R_{ut} = \frac{v_u}{i_b} = h_{11c} + h_{12c} A_{SS} R_E \approx h_{11e} + (1 + h_{21e}) R_E$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12c}=1, h_{22c}=0$



$$R_u = R_{ut} \parallel R_B \approx R_{ut} \approx h_{21} R_E \quad A_o = \frac{v_i}{v_u} \Big|_{i_u=0} = -\frac{h_{21c}}{h_{11c} / R_E - h_{12c} h_{21c}}$$

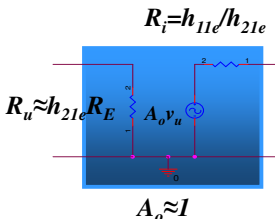
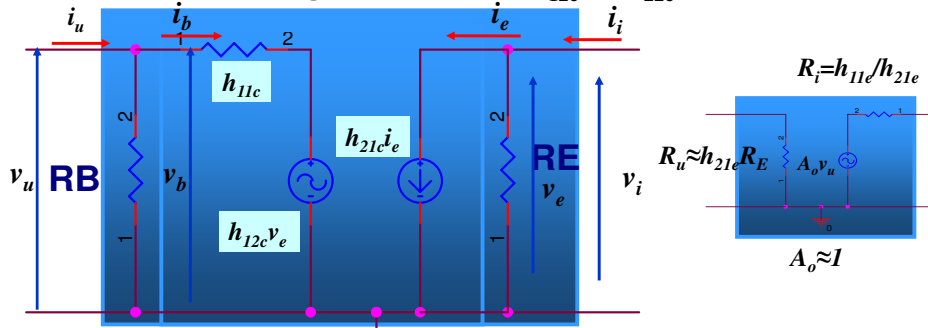
$$A_o \approx \frac{(1 + h_{21e}) R_E}{h_{11e} + (1 + h_{21e}) R_E} \quad A_o < 1 \approx 1$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12c}=1, h_{22c}=0$



$$R_{it} = \frac{v_e}{i_e} \approx \frac{1}{-h_{12c} h_{21c} / (R_B \parallel R_g + h_{11c})} \approx \frac{R_B \parallel R_g + h_{11e}}{(1 + h_{21e})} \quad R_g \ll R_B, h_{11e} \approx \frac{h_{11e}}{(1 + h_{21e})}$$

$$R_i = R_{it} \parallel R_E \approx R_{it} \approx \frac{h_{11e}}{h_{21e}}$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale – model sa $h_{12c}=1, h_{22c}=0$

Velika ulazna otpornost

$$R_u \approx h_{11e} + (1 + h_{21e}) R_E \parallel R_p$$

Naponsko pojačanje ≈ 1

$$A_o \approx 1$$

NE obrće fazu

Strujno pojačanje

$$A_{SS} \approx 1 + \beta$$

Mala izlazna otpornost

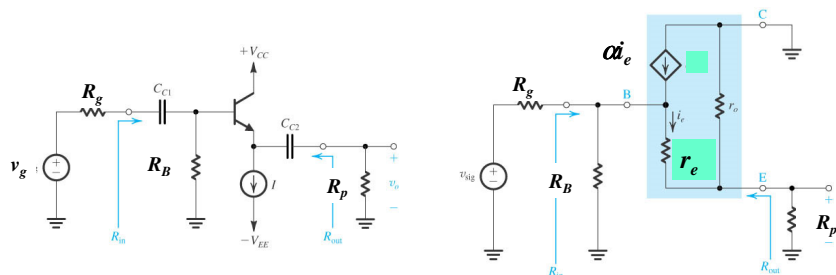
$$R_i = \frac{R_g \parallel R_B + h_{11e}}{1 + h_{11e}}$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale –zamena T- modelom



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

109

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

e) Analiza za male signale –zamena T-modelom

Velika ulazna otpornost $R_u \approx +(1 + \beta)(r_e + R_p)$

Naponsko pojačanje ≈ 1

NE obrće fazu

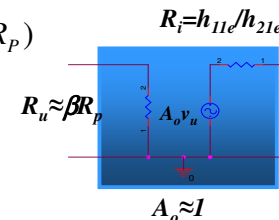
Strujno pojačanje

Mala izlazna otpornost

$$A_o \approx 1$$

$$A_{SS} \approx 1 + \beta$$

$$R_i = \frac{R_g \parallel R_B + r_e}{1 + \beta}$$

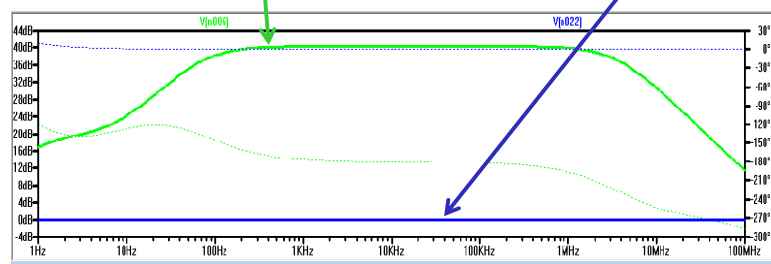
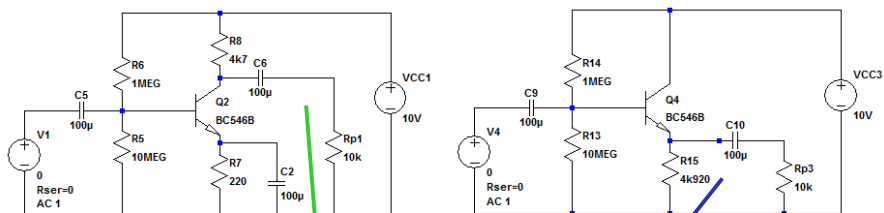


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

110

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

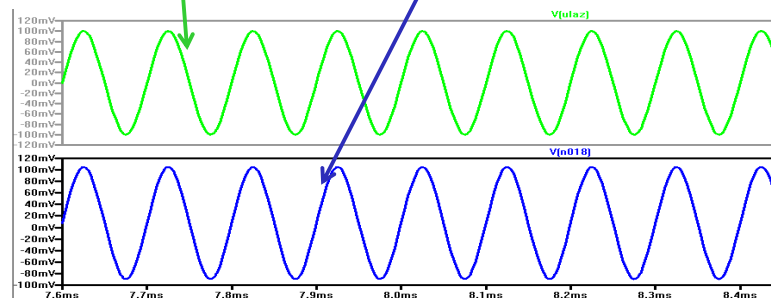
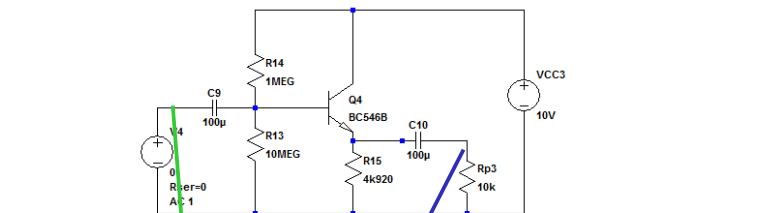


24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

111

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

112



Za vežbu 7.2:

Za pojačavač sa prethodne slike, kod koga je $R_g=10k$, $R_p=1k$, $I=5mA$, $R_B=40k$, $\beta=100$ i $V_A=100V$, naći R_{ut} , $R_{u'}$, A_o , A i R_i . Kolika je maksimalna vrednost amplitude izlaznog prostoperiodičnog signala pri kojoj tranzistor neće ući u oblast zakočenja? Koliki se napon na izlazu očekuje ako je amplituda napona v_{be} ograničena na 10mV. Koliko će biti naponsko pojačanje kada je $R_p=2k$ i $R_p=500\Omega$?

Rešenje:

96.7k; 28.3k; 0.735 V/V; 0.8 V/V, 84 Ω ; 5 V; 1.9 V; 0.768 V/V; 0.685 V/V.

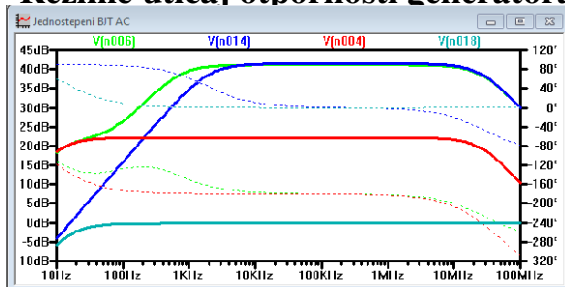
Primena:

Kao bafer između naponskog generatora (pojačavača) sa velikom unutrašnjom otpornošću i potrošača sa malom otpornošću.

Obično izlazni stepen u pojačavačkom lancu koji se vezuje za potrošač male otpornosti.

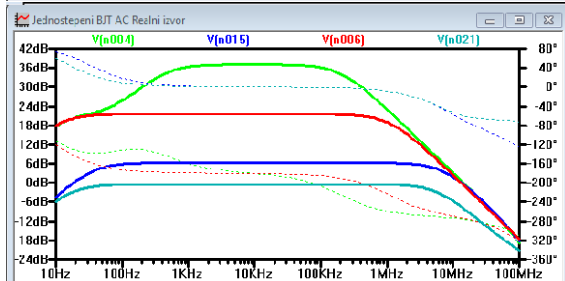
Jednostepeni pojačavači sa BJT

Rezime uticaj otpornosti generatora:



$R_g=0\Omega$

- ZE
- ZE sa R_E
- ZB
- ZC



$R_g=4k7$
 Drastično smanjeno pojačanje ZB sa 40dB na 6dB
 Manja gornja granična frekvencija
 „Preslikano“ R_g

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Domaći 7.2:

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

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

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Domaći 7.2:

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

a) Direktno;



Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

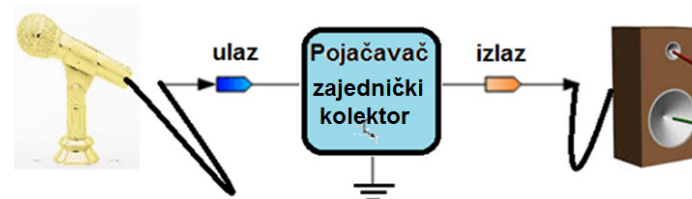


Domaći 7.2:

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

b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:

$R_E=5k, R_B=100k, h_{11E}=1k, h_{12E}=0, h_{21E}=100, h_{22E}=0;$



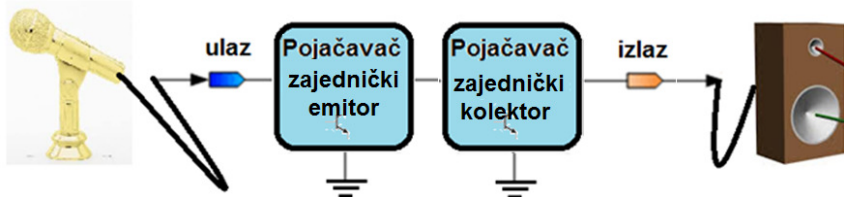
Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Domaći 7.2:

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

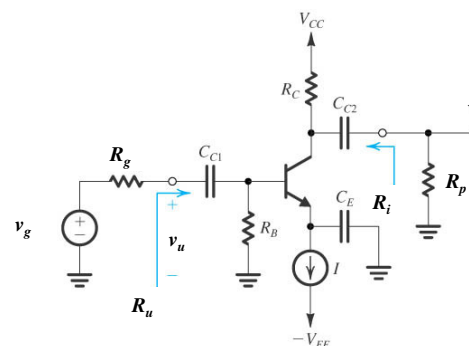
c) preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz domaćeg zadatka 7.1 (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za R_p).



Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

Rezime:

1. Zajednički emitor



$$R_u = R_B \parallel r_\pi = R_B \parallel (1 + \beta)r_e$$

$$A = -\frac{h_{21e}(R_C \parallel R_p)}{h_{11e}}$$

$$A = -g_m(r_o \parallel R_C \parallel R_p) \approx -g_m(R_C \parallel R_p)$$

$$R_i = r_o \parallel R_C \approx R_C$$

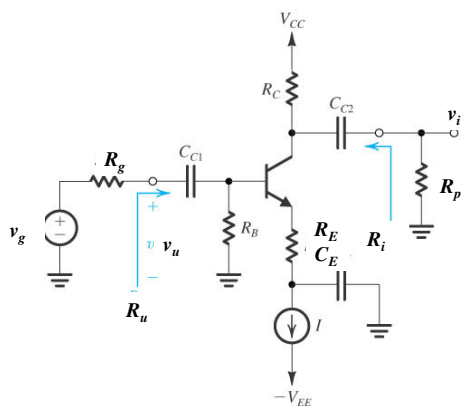
$$A_u = -\frac{R_B \parallel r_\pi}{R_B \parallel r_\pi + R_g} g_m(R_C \parallel R_p)$$

$$A_u \cong -\beta \frac{(R_C \parallel R_p)}{r_\pi + R_g}$$

$$A_{SS} = -g_m R_u \cong -\beta$$

Rezime:

1.a Zajednički emitor sa otpornikom u emitoru



$$R_u = R_B \parallel (1 + \beta)(r_e + R_E)$$

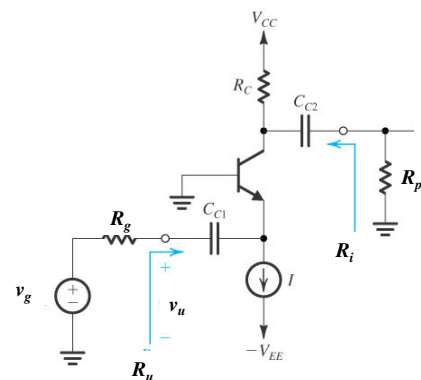
$$A \approx -g_m \frac{(R_C \parallel R_p)}{1 + g_m R_E}$$

$$R_i \approx R_C$$

$$A_u \approx -\beta \frac{(R_C \parallel R_p)}{R_g + (1 + \beta)(r_e + R_E)}$$

Rezime:

2. Zajednička baza



$$R_u = r_e$$

$$A = g_m (R_C \parallel R_p)$$

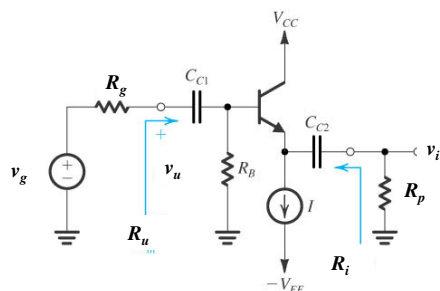
$$R_i \approx R_C$$

$$A_u \approx \alpha \frac{(R_C \parallel R_p)}{R_g + r_e}$$

$$A_{SS} \approx \alpha$$

Rezime:

3. Zajednički kolektor



$$R_u \approx R_B \parallel (1 + \beta)(r_e + R_p)$$

$$A = \frac{R_p}{R_p + r_e} \ll 1$$

$$R_i \approx r_e + \frac{R_g \parallel R_B}{1 + \beta}$$

$$A_u \approx \frac{R_B}{R_g + R_B} \frac{R_p}{\frac{R_g \parallel R_B}{1 + \beta} + r_e + R_p}$$

$$A_{SS} \approx 1 + \beta$$

Rezime:

- **Tranzistori rade u aktivnom režimu:**
BE direktno; BC inverzno;
 $I_c = I_s \exp(v_{be}/V_T); I_b = I_c / \beta$
 $\beta = \alpha / (1 - \alpha); \alpha = \beta / (1 + \beta)$
- **Za male signale**
tranzistor se ponaša kao naponom kontrolisani
strujni izvor sa $g_m = I_c / V_T$
Otpornost između B-E sa strane baze $r_\pi = \beta / g_m$ [kΩ]
- **Pri DC polarizaciji važno je da I_c što manje zavisi od β .**

Rezime:

- **Konfiguracija sa zajedničkim emitorom:**
 - E je na masi za naizmenični signal;**
 - Ulazni signal se dovodi na B;**
 - Izlazni signal uzima se sa C;**
 - Obrće fazu;**
 - Veliko pojačanje napona;**
 - Relativno velika ulazna otpornost;**
 - Relativno velika izlazna otpornost;**
 - Otpornost R_E povećava ulaznu otpornost na račun smanjenja naponskog pojačanja**

Rezime:

- **Konfiguracija sa zajedničkom bazom:**
 - B je na masi za naizmenični signal;**
 - Ulazni signal se dovodi na E;**
 - Izlazni signal uzima se sa C;**
 - Ne obrće fazu;**
 - Veliko pojačanje napona;**
 - Veoma mala ulazna otpornost;**
 - Relativno velika izlazna otpornost (strujni bafer)**

Rezime:

- **Konfiguracija sa zajedničkim kolektorom:**
 - C je na masi za naizmenični signal;**
 - Ulazni signal se dovodi na B;**
 - Izlazni signal uzima se sa E;**
 - Ne obrće fazu;**
 - Pojačanje napona ≈ 1**
 - Velika ulazna otpornost;**
 - Mala izlazna otpornost (naponski bafer)**



Šta smo naučili?

- **Uporediti pojačavače sa ZE, ZB i ZC sa stanovišta naponskog pojačanja, ulazne otpornosti i izlazne otpornosti?**
 - **Električna šema, princip rada pojačavača sa ZE i ekvivalentno kolo za male signale na srednjim frekvencijama.**
 - **Uticaj otpornika u R_E na karakteristike pojačavača sa ZE.**
 - **Električna šema, princip rada pojačavača sa ZC i ekvivalentno kolo za male signale.**

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

> EDUCATION > ELEKTRONIKA

slajdovi u pdf formatu

Jednostepeni pojačavači sa BJT



Ispitna pitanja?

1. U polju izlaznih karakteristika BJT u konfiguraciji pojačavača sa ZE nacrtati statičku radnu pravu i objasniti uticaj promene R_C na naponsko pojačanje. Nacrtati električnu šemu i navesti potrebne izraze.
2. Ekvivalentno kolo pojačavača sa ZE na srednjim frekvencijama (SF), izvesti izraze za pojačanje, ulaznu i izlaznu otpornost.
3. Frekvencijske karakteristike pojačavača sa ZE (objasniti zašto se smanjuje pojačanje na NF i VF).
4. Električna šema, karakteristike i primena pojačavača sa ZB.
5. Ekvivalentno kolo pojačavača sa ZB na SF, izvesti izraze za pojačanje, ulaznu i izlaznu otpornost.
6. Električna šema, karakteristike i primena pojačavača sa ZC.
7. Ekvivalentno kolo pojačavača sa ZC na SF, izvesti izraze za pojačanje, ulaznu i izlaznu otpornost.
8. Objasniti fazne stavove izlaznog i ulaznog napona kod pojačavača sa ZE, ZB i ZC.

24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

129

Sledećeg časa

Diferencijalni i višestepeni pojačavači

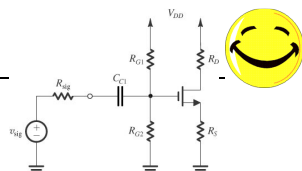
24. novembar 2016.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

130

Rešenje: Domaći 6.1

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$, $\lambda=0$. Poznato je $V_{DD}=15V$.

- a) Odrediti vrednosti ostalih elemenata kola pod uslovom da je $I_D=0.5mA$ i da su padovi napona na R_D i R_S isti i iznose $V_{DD}/3$. ($R_D=R_S=10k$, $R_{G1}=8M$, $R_{G2}=7M$)

$$V_{R_D} = V_{R_S} = V_{DD}/3 = 5V$$

$$R_D = \frac{V_{R_D}}{I_D} = \frac{V_{DD}/3}{I_D} = \frac{5V}{0.5mA} = 10k\Omega$$

$$R_S = \frac{V_{R_S}}{I_D} = \frac{V_{DD}/3}{I_D} = \frac{5V}{0.5mA} = 10k\Omega$$

R_{G1} i R_{G2} moraju da obezbede potreban napon na gejtu V_G . Određuju se iz uslova

$$V_G = [R_{G2}/(R_{G1} + R_{G2})] V_{DD}$$

Zato prvo treba odrediti V_G , odnosno V_{GS} .

R_{G1} i R_{G2} moraju da imaju veliku vrednost da ne bi umanjivali ulaznu otpornost pojačavača. Bitan je njihov odnos, koji obezbeđuje željeni napon. Zato se jedan usvoji a drugi računa.

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

$$V_{GS} - V_t = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 10^{-3}}} = 1$$

$$V_{GS} = V_t + 1V = 2V$$

$$V_{R_S} = V_S = V_{DD}/3 = 5V$$

$$V_G = V_S + V_{GS} = V_{DD}/3 + V_{GS}$$

$$V_G = 5 + 2 = 7V$$

Da bi $V_G = [R_{G2}/(R_{G1} + R_{G2})] V_{DD}$ dalo 7V za $V_{DD}=15V$, zgodno je da njihov zbir bude 15, a onda sledi da je $R_{G1}=8M$ i $R_{G2}=7M$.

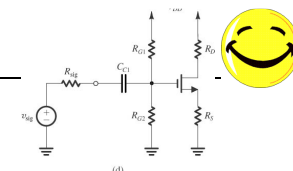
24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

131

Rešenje: Domaći 6.1

Pojačavač sa zajedničkim sorsom



U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$, $\lambda=0$. Poznato je $V_{DD}=15V$.

- b) Izračunati za koliko će se promeniti I_D ukoliko se tranzistor zameni drugim kod koga je $V_t=1.5V$. ($I_D = 0.45mA$, $\Delta I_D = -0.05mA$, $\Delta I_D/I_D = -10%$)

Za vrednosti elemenata kola izračunate pod a), V_G je konstantno=7V, a V_{GS} i I_D se menjaju:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = AV_{OS}^2$$

$$V_{OS} = V_{GS} - V_t \Rightarrow V_{GS} = V_{OS} + V_t$$

$$V_G = V_{GS} + R_S I_D = V_{OS} + V_t + R_S AV_{OS}^2$$

Zamenom brojnih vrednosti za $V_t=1.5V$, $V_G = 7V$, $R_S=10k$, $\Delta R_S=10k$ i $A=0.5mA/V^2$, dobija se kvadratna jednačina po V_{OS} :

$$5V_{OS}^2 + V_{OS} - 5.5 = 0 \Rightarrow V_{OS} = 0.953V \Rightarrow I_D = AV_{OS}^2 = 0.4546mA$$

Usvajanjem priblične vrednosti $I_D = 0.45mA$, dobija se $\Delta I_D = -0.05mA$, odnosno $\Delta I_D/I_D = -10%$

24. novembar 2016.

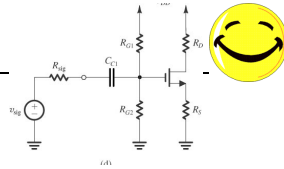
Jednostepeni MOSFET pojačavači

132

Rešenje: Domaći 6.1

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$, $\lambda=0$. Poznato je $V_{DD}=15V$.



- c) Ponoviti postupak pod a) i b) u slučaju da se zadrži ista vrednost za I_D i R_D a da je $R_S=0$. ($R_{G1}=13M$, $R_{G2}=2M$, $\Delta I_D = -0.375mA$, $\Delta I_D/I_D=-75\%$)

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

$$V_{GS} - V_t = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 10^{-3}}} = 1$$

$$V_{GS} = V_t + 1V = 2V$$

Da bi $V_G = [R_{G2} / (R_{G1} + R_{G2})] V_{DD}$ dalo 2V za $V_{DD}=15V$, zgodno je da njihov zbir bude 15, a onda sledi da je $R_{G1}=13M$ i $R_{G2}=2M$.

S obzirom da je $R_S=0$, V_{GS} ne zavisi od V_t tako da je:

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

$$I_D = \frac{1}{2} 10^{-3} (2 - 1.5)^2 = 0,125mA$$

$$\Delta I_D = (0,5 - 0,125)mA = -0,375mA$$

$$\Delta I_D / I_D = -(0,375 / 0,5) = -0,75$$

Znači da je osetljivost sa $\Delta I_D / I_D = -10\%$ porasla na $\Delta I_D / I_D = -75\%$

24. novembar 2016.

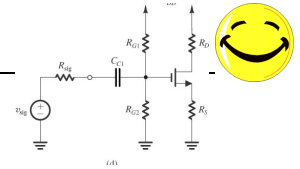
Jednostepeni MOSFET pojačavači

133

Rešenje: Domaći 6.1

Pojačavač sa zajedničkim sorsom

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$, $\lambda=0$. Poznato je $V_{DD}=15V$.



- d) Izračunati naponsko pojačanje ulaznu i izlaznu otpornost u slučaju a) i c). ($A_v = -10/11$, $R_{ua} = 3.73M$, $R_{ic} = 10k$, $A_c = 10$, $R_{uc} = 1.73M$, $R_{ic} = 10k$)

$$A_o = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)} = \frac{2 \cdot 0,50 \cdot 10^{-3}}{1} = 1mA/V$$

$$A_o = -\frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3}{1 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3} = -\frac{10}{11} = 0,91$$

$$R_u = \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 7 \cdot 10^6}{8 \cdot 10^6 + 7 \cdot 10^6}$$

$$R_u = \frac{56 \cdot 10^{12}}{15 \cdot 10^6} = 3,73M\Omega$$

$$R_i = R_D = 10k\Omega$$

24. novembar 2016.

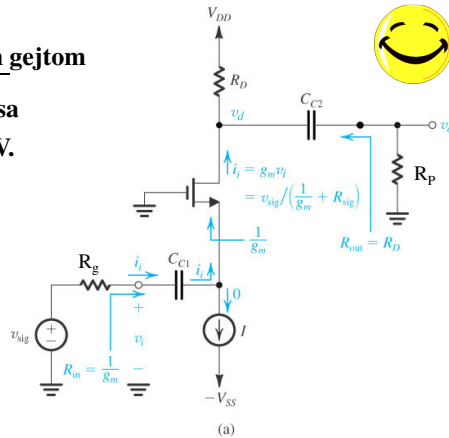
Jednostepeni MOSFET pojačavači

134

Rešenje: Domaći 6.2

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1.5V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=1mA/V^2$, $V_A=75V$. Poznato je $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_D=15k$.



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

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D = 10 - 15 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 2,5V$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = -V_{GS}$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = V_{OV}^2$$

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3}}} = 1$$

$$V_{GS} = V_{OV} + V_t = 1 + 1,5 = 2,5V \Rightarrow V_S = -2,5V$$

24. novembar 2016.

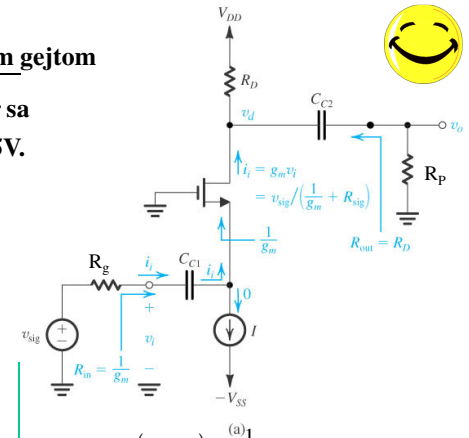
Jednostepeni MOSFET pojačavači

135

Rešenje: Domaći 6.2

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1.5V$, $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=1mA/V^2$, $V_A=75V$. Poznato je $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_D=15k$.



- b) Odrediti A_θ , R_u , R_i i A_v ukoliko je $R_p=15k$, $R_g=50\Omega$. ($A_\theta=15V/V$, $R_u=1k$, $R_i=15k$, $A_v=7.5V/V$)

$$A_o = g_m R_D$$

$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)} = \frac{2 \cdot 0,50 \cdot 10^{-3}}{1} = 1mA/V$$

$$A_o = g_m R_D = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^3 = 15V/V$$

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

$$R_i = R_D = 15k\Omega$$

24. novembar 2016.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

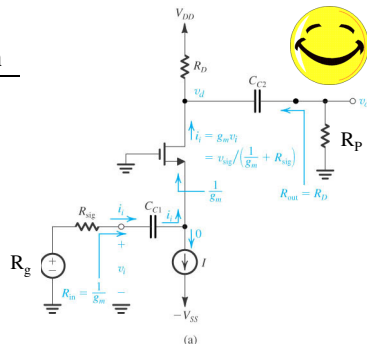
136

Rešenje: Domaći 6.2

Pojačavač sa zajedničkim gejtom

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1.5V$, $\mu_n C_{ox}' W/L=2A=1mA/V^2$, $V_A=75V$.
Poznato je $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_D=15k$.

- c) Odrediti ukupno naponsko pojačanje ukoliko je $R_g=1k, 10k, 100k$.



$$A_v = g_m (R_D \parallel R_p) \frac{1}{1 + g_m R_{gen}} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} \frac{1}{1 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot R_{gen}} = \frac{7.5}{1 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot R_{gen}}$$

R_{gen} [kΩ]	1	10	100
A_v [V/V]	3.75	0.68	0.07

Rešenje: Domaći 6.3

Pojačavač sa zajedničkim g

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1.5V$, $V_A=75V$, $\mu_n C_{ox}' W/L=2A=1mA/V^2$.
Poznato je $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_G=4.7M$, $R_P=15k$.

- a) Odrediti vrednosti jednosmernih napona V_G i V_S .

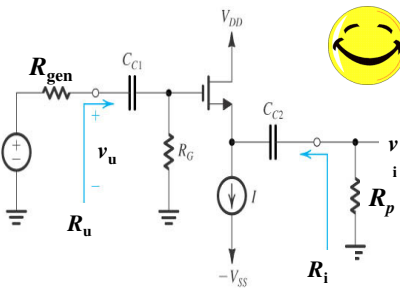
$$V_G = 0$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - V_S \Rightarrow V_S = -V_{GS}$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = V_{OV}^2$$

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0.5 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 10^{-3}}} = 1$$

$$V_{GS} = V_{OV} + V_t = 1 + 1.5 = 2.5V \Rightarrow V_S = -2.5V$$



Rešenje: Domaći 6.3

Pojačavač sa zajedničkim g

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa $V_t=1.5V$, $V_A=75V$, $\mu_n C_{ox}' W/L=2A=1mA/V^2$.
Poznato je $V_{DD}=V_{SS}=10V$, $I_D=0.5mA$, $R_G=4.7M$, $R_P=15k$.

- b) Odrediti A_0 , R_u , R_i i A_v ukoliko je $R_{gen}=1M\Omega$.

$$A_0 = \frac{g_m r_o}{1 + g_m r_o}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \cdot 0.5mA}{1V} = 1mS$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{75V}{0.5mA} = 150k\Omega$$

$$A_0 = \frac{g_m r_o}{1 + g_m r_o} = \frac{10^{-3} \cdot 150 \cdot 10^3}{1 + 10^{-3} \cdot 150 \cdot 10^3} = \frac{150}{151} = 0.993V/V$$

$$R_u = R_G = 4.7M\Omega$$

$$R_i = \frac{r_o}{1 + g_m r_o} = \frac{150k\Omega}{151} = 0.993k\Omega \approx 1k\Omega$$

$$A_v = \frac{R_p}{R_p + R_i} \cdot A_0 \cdot \frac{R_u}{R_u + R_{gen}}$$

$$A_v = \frac{15k\Omega}{15k\Omega + 1k\Omega} \cdot 0.993 \cdot \frac{4.7M\Omega}{4.7M\Omega + 1M\Omega}$$

$$A_v = \frac{15}{16} \cdot 0.993 \cdot \frac{4.7}{5.7} = 0.768V/V$$

