

ELEKTRONIKA I

Zapiski z avditornih vaj

3

TK

Šolsko leto 2008/2009
Izvajalec Matej Zajc

Avtor dokumenta Vesna Koderman
Skeniranje Simon Kovše



UREJANJE DOKUMENTA

VERZIJA	01.01
DATUM	10.01.2010

OPOMBE

--

1. semester ... analogna elektronika

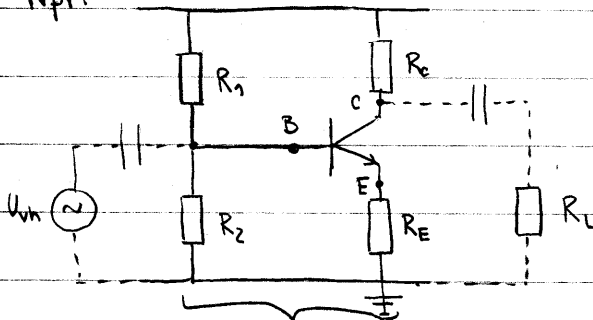
linearna

nelinearna

ojačevalniki (-bipol. tranzistor)

1. Laboratorijska vaja

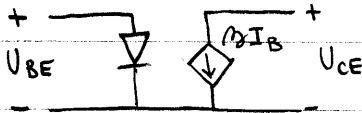
Npr.



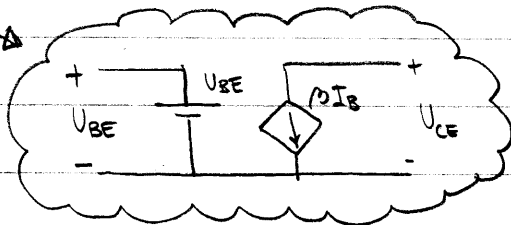
(isto, kar je ertano pride v poštev pri 2. lab vaji - malosignalni model)

... Ostalo pride v poštev pri 1. lab vaji - velikosignalni model

- Naboga napajalnega vezja je, da spravimo Tranzistor v delovno točko (DT)
- Ko se pogovarjamo o DT, uporabimo VELIKOSIGNALNI MODEL VEZJA (1. lab. vaja);
- Nadomestni model za velike signale:

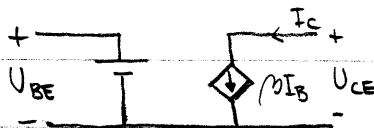


- DT naj bo v AKTIVNEM PODROČJU (-za analogno elektroniko je vedno tako, v digitalni elektroniki pa imamo večino primerov v nasičenju)
- V aktivnem (področju se vezje poenostavi:



$U_{BE} = U_D$

①) Določite I_C in U_{CE} !



⇒ To rešimo tako, da damo v vezje namesto tranzistorja nadomestni model.

Za aktivno področje velja:

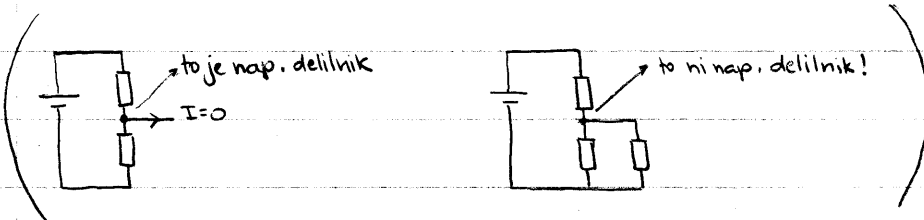
$I_C = \beta I_B$

a) Zanemarimo I_B

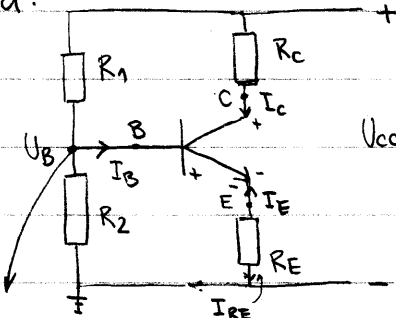
$\Rightarrow I_c = \beta I_B \approx 100 I_B$ (v miliAmperih) ... EC vzamemo $\beta = 100$ naredimo grobo poenostavitve!

I_B ... je v μ Amperih ... zelo majhen, zato ga lahko tudi zanemarimo

$\Rightarrow I_B \approx 0$



1. lab. vaja:



\Rightarrow Napetost U_B se bo sedaj razdelila

med $\rightarrow U_{BE} + U_{RE}$ ($U_{BE} \approx 0,7V$)

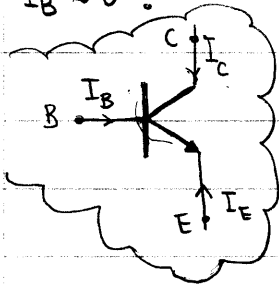
$\Rightarrow U_B = U_{BE} + U_{RE}$
 poznamo \rightarrow poznamo?

$\Rightarrow U_B = U_{BE} + I_E R_E$

$\Rightarrow I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = -I_{RE}$

$\Rightarrow I_E \approx I_B + I_C = I_B (\beta + 1)$
 ker je $\beta \approx 100$ lahko 1 zanemarimo!

to lahko sedaj prepeštevamo kot nap. delilnik, saj je $I_B \approx 0$!



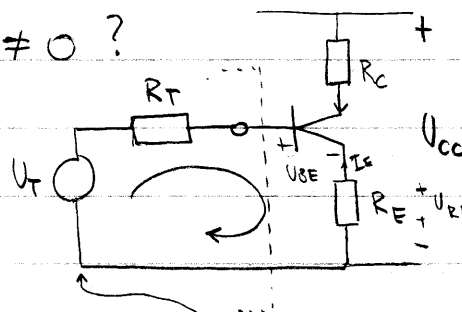
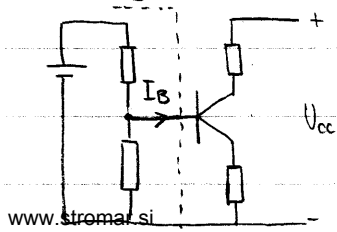
$\beta + 1 \approx \beta \Rightarrow I_E \approx I_B / \beta \Rightarrow I_E \approx I_C$

$\Rightarrow I_c \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$

$U_{cc} = U_c + U_{ce} + U_e$?

$\Rightarrow U_{cc} = I_c \cdot R_c + U_{ce} + I_E \cdot R_E \quad / \quad I_c \approx I_E \Rightarrow U_{ce} = U_{cc} - I_c (R_c + R_E)$

b) Kaj pa če $I_B \neq 0$?



$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{cc}$

$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Po Theveninovem teoremu lahko ta del vezja nadomestimo z:

$$\Rightarrow U_T = I_B \cdot R_T + U_{BE} + I_E \cdot R_E \quad / \quad I_E = \beta I_B$$

$$\Rightarrow U_T = I_B \cdot R_T + U_{BE} + \beta I_B R_E$$

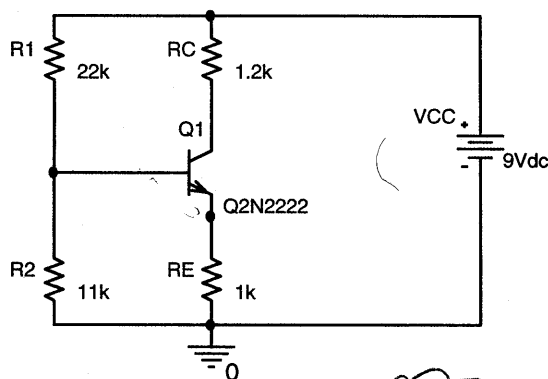
$$\Rightarrow U_T = I_B (R_T + \beta R_E) + U_{BE} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T + \beta R_E} ; \quad I_E = \beta I_B$$

Bipolarni tranzistor v orientaciji skupni emitor: delovna točka

Namen vaje:

- spoznavanje okolja *OrCAD PSpice*
- enosmerna analiza ojačevalne stopnje z bipolarnim tranzistorjem v orientaciji s skupnim emitorjem

Vežje:



$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC}$$

$$I_B = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T + \beta R_E}$$

$$U_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$\beta = 100$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$I_C = \beta I_B$$

Naloga:

1. $R_1 = 11 \text{ k}\Omega$ in $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$.

Izračun delovne točke:

$$I_B = 21.23 \mu\text{A} \quad U_{CE} = 4.38 \text{ V} \quad I_C = 2.1 \text{ mA}$$

Rezultati simulacij (bias point):

$$I_B = 13.44 \mu\text{A} \quad U_{CE} = 4.1 \text{ V} \quad I_C = 2.22 \text{ mA}$$

2. $R_1 = 110 \text{ k}\Omega$ in $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$.

Izračune delovne točke:

$$I_B = 13 \mu\text{A} \quad U_{CE} = 6.1 \text{ V} \quad I_C = 1.3 \text{ mA}$$

Rezultati simulacij:

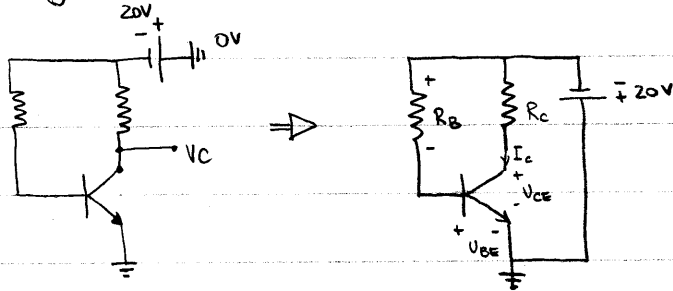
$$I_B = 9.856 \mu\text{A} \quad U_{CE} = 5.46 \text{ V} \quad I_C = 1.6 \text{ mA}$$

Ugotovitve: Rezultati se približno ujemajo s simulacijo, saj smo mi naredili cel kup preprostitev in smo vzeli $\beta = 100$

3. Dodatna naloga: ponovite vajo za nalogo 6.

2. Laboratorijska vaja → Temperaturna stabilnost in analiza občutljivosti delovne točke

• Vežje 1: Določiti delovno točko (U_C , I_C)



$$I_C \cdot R_C + U_{CE} = U_{CC}$$

$$\rightarrow U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

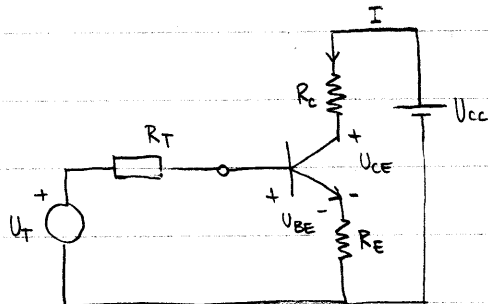
$$I_C = \beta I_B$$

$$-U_{CC} + I_B R_B + U_{BE} = 0$$

$$\rightarrow -U_{CC} + \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + U_{BE} = 0 \quad \rightarrow \quad I_C = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B / \beta} = \frac{20V - 0.7V}{600k\Omega / 175} = \underline{\underline{5.63 \text{ mA}}}$$

$$\rightsquigarrow U_{CE} = 20V - 5.63 \text{ mA} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ k}\Omega = \underline{\underline{8.74 \text{ V}}}$$

• Vežje 2:



$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15}{4} \text{ k}\Omega$$

$$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{CC} = 5V$$

$$U_{CE}: U_{CC} = U_{CE} + I_E R_E + R_C (I_B + I_C) \quad \rightarrow \quad U_{CE} = U_{CC} - I_E R_E - R_C (I_C / \beta + I_C) =$$

$$= U_{CC} - I_C R_E - R_C I_C (\frac{1}{\beta} + 1) \doteq$$

$$\underline{\underline{U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_E + R_C)}}$$

$$I_C: -U_T + I_B R_T + U_{BE} - I_E R_E = 0 \quad \rightarrow \quad -U_T + \frac{I_C}{\beta} R_T - U_{BE} - I_C R_E = 0 \quad \rightarrow$$

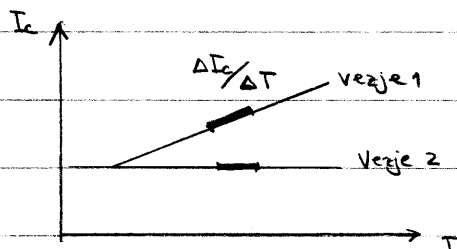
$$\rightarrow -U_T + I_C (\frac{R_T}{\beta} + R_E) - U_{BE} = 0$$

$$\rightarrow I_C = \frac{U_T - U_{BE}}{\frac{R_T}{\beta} + R_E}$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{(5 - 0.7)V}{\frac{15000}{4 \cdot 175} + 1k\Omega} = \underline{\underline{4.21 \text{ mA}}}$$

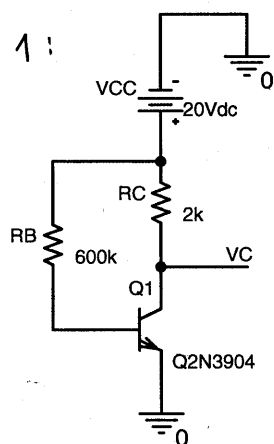
$$U_{CE} = 20V - (4.21 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3)V = \underline{\underline{7.37 \text{ V}}}$$

• Temperaturna odvisnost:

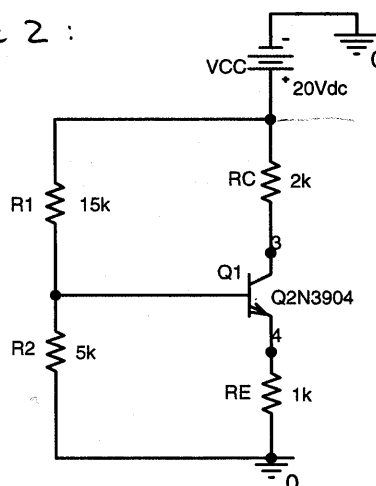


• Vzamemo vezje 2, ker je temperaturno bolj stabilno!

Vezje 1:



Vezje 2:



Temperaturna stabilnost delovne točke

Namen:

- določitev delovne točke ojačevalnikov z bipolarnim tranzistorjem
- določitev temperaturne stabilnosti delovne točke

Opis:

1. Izračunajte delovno točko tranzistorja (I_C in U_{CE}). Za tranzistor upoštevajte naslednje podatke:
 $U_{BE} = 0,7V$, $\beta_F = 175$.
2. V okolju *Capture* sestavite vezje ter izvršite izračun delovne točke (*bias point*). Rezultate preverite z izračunanimi.
3. Določite temperaturno stabilnost kolektorskega toka I_C v temperaturnem intervalu $[-50^\circ C, +50^\circ C]$. Temperaturna stabilnost poda spremembo izhodne spremenljivke pri spremembi temperature vezja za $1^\circ C$.

Analiza občutljivosti delovne točke

Namen:

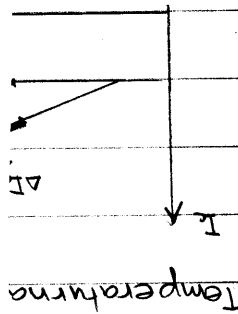
- določitev občutljivosti delovne točke na spremembe parametrov v vezju.

Opis:

4. V nastavitvah simulacijske datoteke za izračun delovne točke vezja 2, izberite analizo občutljivosti (**Perform Sensitivity Analysis**). Za izhodno spremenljivko izberite U_{CE} , za katero se bo izvedla analiza občutljivosti. PSpice izračuna diferencialno občutljivost (**.SENS**) s katero dobimo vpogled v diferencialno občutljivost izbrane izhodne spremenljivke od vseh neničelnih podatkov v vezju. Z drugimi besedami, rezultat analize poda vpliv tolerance parametra na izhodno spremenljivko, v našem primeru na delovno točko vezja.

1. Delovna točka vezja:

	Izračun	Rezultati simulacij
vezje 1:	$U_{CE} = 8.74 \text{ V}$ $I_C = 5.63 \text{ mA}$	$U_{CE} = 8.86 \text{ V}$ $I_C = 5.570 \text{ mA}$
vezje 2:	$U_{CE} = 7.1 \text{ V}$ $I_C = 4.3 \text{ mA}$	$U_{CE} = 7.44 \text{ V}$ $I_C = 4.2 \text{ mA}$



2. Temperaturna stabilnost:

	IC(Q1):
vezje 1:	$\frac{\Delta I_C}{\Delta T} = 26.7 \cdot 10^{-6} \text{ A/}^\circ\text{C}$
vezje 2:	$\frac{\Delta I_C}{\Delta T} = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ A/}^\circ\text{C}$

3. Analiza občutljivosti:

- Če se spremeni vrednost R_C (poveča za 10%) za koliko se spremeni napetost U_{CE} ?

$$\Delta U_{CE} = -0.832 \text{ V}$$

- Sprememba katerega izmed uporov napajalnega vezja povzroči največjo spremembo napetosti U

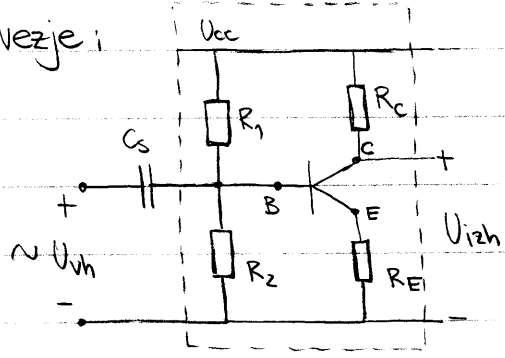
$$R_1$$

- Če se spremeni vrednost parametra tranzistorja BF za 10% za koliko se spremeni napetost U_{CE} ?

$$\Delta U_{CE} = -0.01244 \text{ V}$$

Avditorne vaje

1. vezje:



Vloga C_s : prepušča signal za enosmerne razmere.

- Tranzistor obratuje, če ga spravimo v DT, zato mu moramo dati primerne napetosti na sponke.

- C_s ... ko je prehodnega pojava konec, imamo odprte sponke...

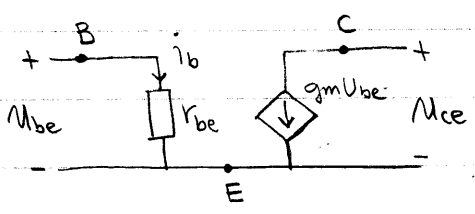
- Vezja se razlikujejo po temperaturni odvisnosti; - ker je bil pri vaji 2 tranzistor 2 bolj temperaturno stabilen, smo ga izbrali.

~ZANIMA NAS:

- 1.) DT (....jo znamo izračnati)
- 2.) Malosignalna analiza vezja - MALOSIGNALNI MODEL -

→ Uporabimo INKREMENTALNI REZISTIVNI (samo upori) NADOMESTNI MODEL!

↳ (zelo poenostavljen π model ... y-parametri)



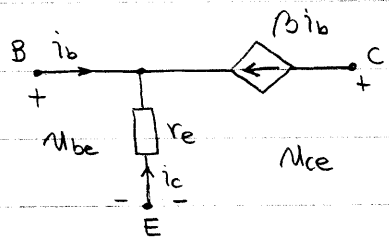
→ Vstavimo namesto tranzistorja

$$g_m = I_c / U_T$$

$$r_{be} = \beta / g_m$$

... V dobočenih primerih (npr. druge orientacije tranzistorja) ta model ni primeren in moramo uporabiti T-model.

→ T-MODEL:

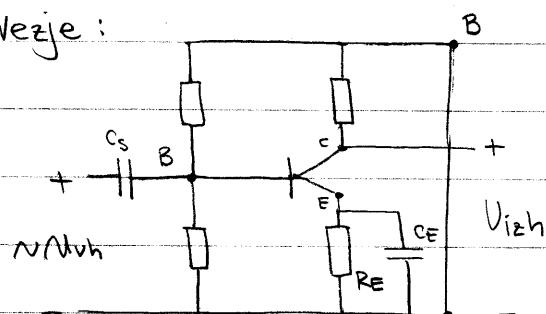


$$r_e = U_T / I_E$$

... Zanima nas, kaj se zgodi (katačen je izhod), če damo na vhod neko napetost ... Pogledamo vezje in narišemo nadomestno (poenostavljeno) vezje.

→ Idealni napetostni vir ima notranjo upornost 0! ^{zato pa} Napetostni vir nadomestimo s kratkim stikom, tokovni vir pa z odprtimi spojniki!

Vezje:

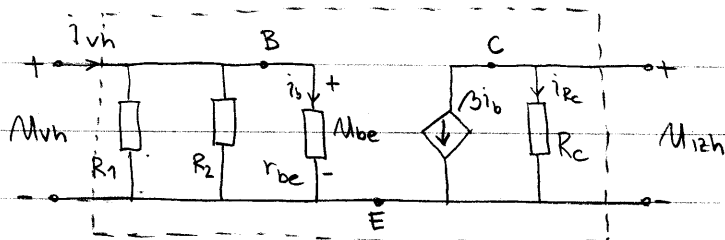


• U_{ce} je enosmerna napetost, ki nam hodi narobe, zato naredimo kratek stik.

• Za majhne signale kondenzatorja C_E in C_s pomeni kratek stik - ker prepusti cel signal.

• Ker imamo namesto C_E kratek stik, potem ves tok steče tam čez in R_E ne igra nobene vloge, zato ga lahko pri nadomestnem vezju kar spustimo → Pri malosignalni analizi R_E ne igra nobene vloge!

⇒ Nadomestno vezje:



četrupol

ojačanje: $A_u = \frac{U_{izh}}{U_{vh}}$

$$\beta \cdot i_b = g_m U_{be}$$

$$g_m = I_c / U_T$$

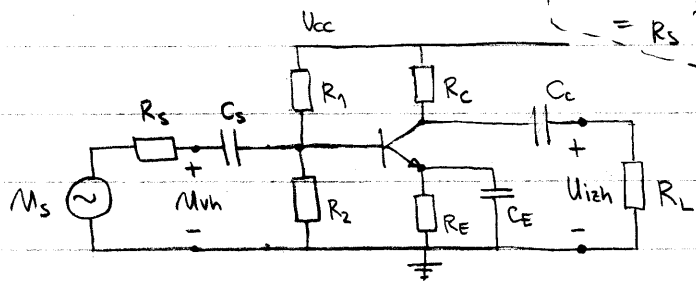
$$U_{izh} = i_{Rc} \cdot R_c = -g_m U_{be} \cdot R_c ; \quad U_{vh} = U_{be} \quad ; \quad R_{izh} = R_c$$

$$R_{vh} = \frac{U_{vh}}{i_{vh}} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be} ; \quad i_{vh} \text{ dobijajo trije vzporedno vezani upori ... } R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}$$

• Brez DT ne moremo računati elemente malosignalne analize! Najprej izračunamo DT!

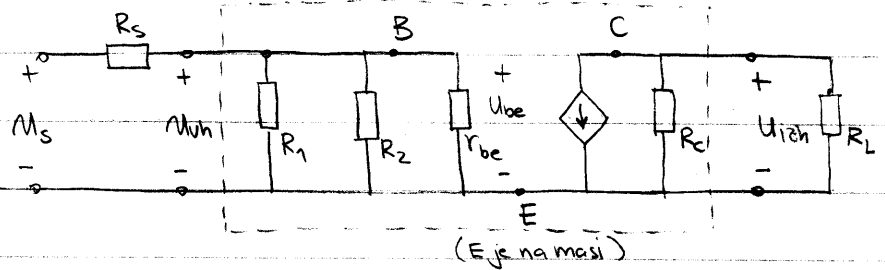
• Upoštevamo, kje naredimo kratek stik in narišemo nadomestno vezje!

2. vezje:



$$\begin{aligned}
 |M_s| &= i_b R_s + i_b r_{be} = \\
 &= R_s (i_{b12} + i_b) + i_b r_{be} = \\
 &= R_s \frac{i_b r_{be}}{R_{12}} + R_s i_b + i_b r_{be} = \\
 &\Rightarrow \frac{R_s}{R_{12}} r_{be} + R_s + r_{be} = \\
 &= R_s \left(\frac{r_{be}}{R_{12}} + 1 \right) + r_{be} = \\
 &= R_s \left(\frac{r_{be} + R_{12}}{R_{12}} \right) + r_{be}
 \end{aligned}$$

⇒ Nadomestno vezje:



$$R_{izh} = \frac{U_z}{i_z} = R_c$$

$$A_{us} = \frac{U_{izh}}{M_s} = - \frac{R_{vh}}{R_{vh} + R_s} \cdot g_m R_c$$

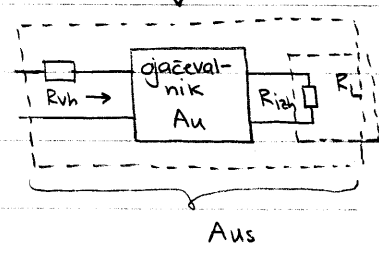
$$M_{vh} = \frac{(R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be})}{R_s + R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}} \cdot M_s = \frac{R_{vh}}{R_s + R_{vh}} \cdot M_s$$

Zakaj je ta minus?

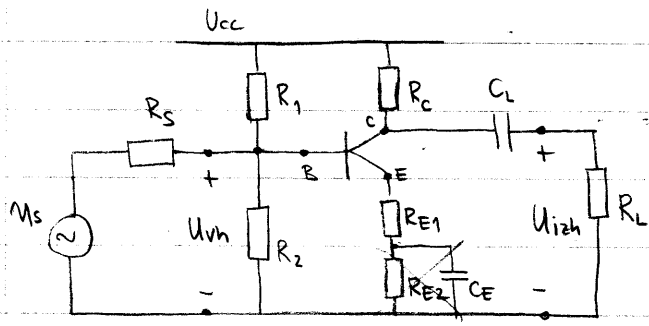
- Ker ojačevalnik v orientaciji s skupnim emitorjem invertira fazo! Obrnjena faza za 180°

• Orientacija s skupnim emitorjem - pri nadomestnem vezju je emitor na masi!

ojačevalnik



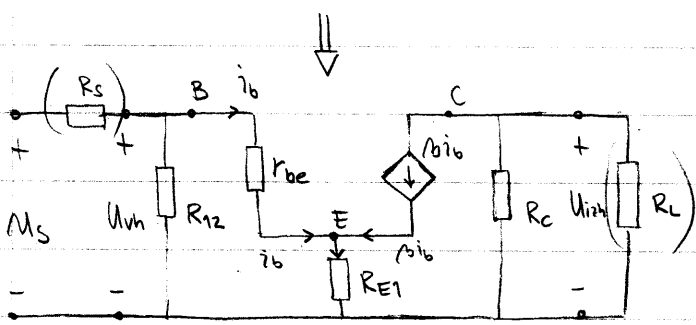
→ Ojačevalnik (2. vezje) sedaj še malo nadgradimo → 3. vezje:



$$A_u = \frac{U_{izh}}{M_{vh}}$$

$$U_{izh} = -\beta i_b \cdot R_c$$

$$M_{vh} = r_{be} \cdot i_b + R_{E1} (i_b + \beta i_b)$$



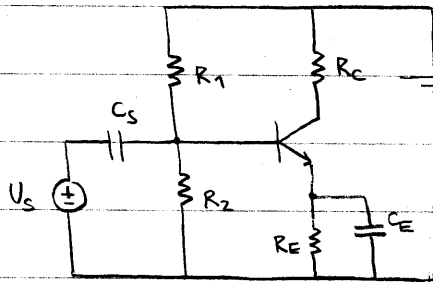
$$\begin{aligned}
 \Rightarrow A_u &= \frac{-\beta i_b \cdot R_c}{i_b (r_{be} + R_{E1} (\beta + 1))} = \frac{-R_c / \beta}{r_{be} + (\beta + 1) R_{E1}} = \\
 &= \frac{-R_c / \beta}{\beta / g_m + (\beta + 1) R_{E1}} = \frac{-R_c \cdot g_m}{1 + R_{E1} \cdot g_m}
 \end{aligned}$$

$$\approx - \frac{R_c}{R_{E1}} \quad ; \quad R_{E1} > \frac{1}{g_m} \cdot 10$$

ojačanje bo odvisno le od razmerja uporov!

3. Lab. vaja: Bipolarni tranzistor v orientaciji skupni emitor

VEZJE 1:



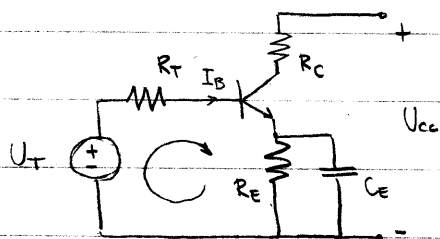
$V_{cc} = 12V$

$R_1 = 68 k\Omega, R_2 = 33 k\Omega$

$R_c = 1.8 k\Omega, R_E = 1 k\Omega$

$\beta = 120; U_{BE} = 0.7V$

a) D.T.



$I_c, U_{CE} = ?$

$$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{cc} = 3.92V$$

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 22.22 k\Omega$$

$$V_{cc} = I_c \cdot R_c + U_{CE} + R_E \cdot I_E$$

$$\Rightarrow U_{CE} = V_{cc} - I_c (R_c + R_E) = \underline{4.4V}$$

$$I_c = \beta \cdot I_B \quad (I_c = \beta \cdot I_B)$$

$$U_T = R_T \cdot I_B + I_E \cdot R_E + U_{BE}$$

$$\Rightarrow U_T = I_B (R_T + \beta R_E) + U_{BE}$$

$$\Rightarrow U_T = I_c \left(\frac{R_T}{\beta} + R_E \right) + U_{BE}$$

$$\Rightarrow I_c = \frac{(U_T - U_{BE})}{\left(\frac{R_T}{\beta} + R_E \right)}$$

$$\Rightarrow I_c = \underline{2.72 mA}$$

b) $R_{vh}, R_{izh}, A_{us} \dots ?$ (malosignalna analiza)

Nadomestno vezje:

$$R_{12} = R_T = 22.22 k\Omega$$



Kdaj uporabimo minus?

$$\Rightarrow R_{vh} = R_{12} \parallel r_{be} =$$

$$= \frac{22.22 \cdot 1.13}{22.22 + 1.13} k\Omega = \underline{1.07 k\Omega}$$

$$r_{be} = \beta / g_m$$

$$r_{be} = \frac{U_{be}}{I_b} = \beta / g_m = \beta / I_c \cdot U_T = \left(\frac{120}{2.72} \cdot 25.66 \right) \Omega = 1.13 k\Omega$$

$$\Rightarrow R_{izh} = R_c = \underline{1.8 k\Omega}$$

$$A_{us} = \frac{U_2}{U_1} = R_c \cdot \beta / r_{be} = -R_c \cdot g_m =$$

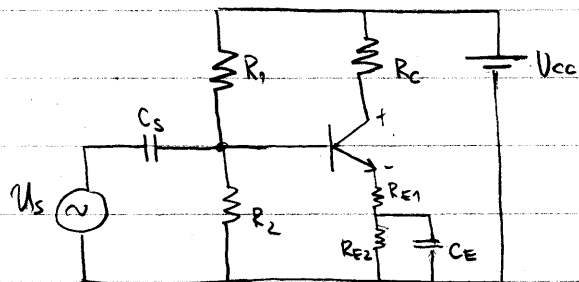
$$= \underline{190}$$

$$U_1 = U_{be}; \quad U_2 = -R_c \cdot \beta \cdot i_b = -R_c \cdot \beta \cdot U_{be} / r_{be}$$

$$g_m = \frac{I_c}{U_T} =$$

$$= \frac{2.72 mA}{25.66 mV} = 0.106$$

VEZJE 2:



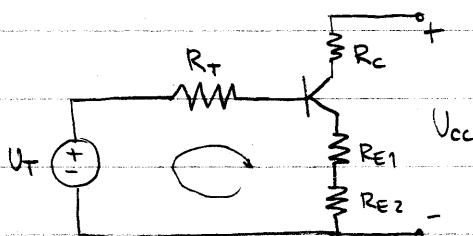
$$R_{E1} = 100 \Omega$$

$$R_{E2} = 900 \Omega$$

a) D.T. $I_c, U_{CE} = ?$

$$R_T = 22.22 \text{ k}\Omega$$

$$U_T = 3.92 \text{ V}$$

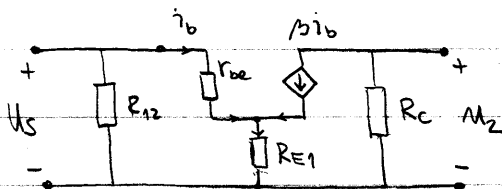


$$U_T = R_T \cdot I_B + U_{BE} + I_E (R_{E1} + R_{E2}) \Rightarrow I_C = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T / \beta + (R_{E1} + R_{E2})} = \underline{2.72 \text{ mA}}$$

$$U_{CC} = R_c \cdot I_C + U_{CE} + (R_{E1} + R_{E2}) \cdot I_E \Rightarrow U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_c + R_{E1} + R_{E2}) = \underline{4.4 \text{ V}}$$

b) $R_{vh}, R_{izh}, A_{us} \dots ?$ malosignalna analiza:

- nadomestno vezje:



$$R_{vh} = R_{12} \parallel (r_{be} + (\beta + 1)R_{E1}) \dots \text{lahko zapišemo direktno, glede na to, da tok, ki teče skozi } R_{E1} \text{ enat } i_b + \beta \cdot i_b = i_b(1 + \beta)$$

$$R_{vh} = \frac{U_{vh}}{i_{vh}} \dots \text{iz tega lahko izhajamo}$$

$$i_{vh} = i_b + i_{12} = i_b + \frac{U_{vh}}{R_{12}}$$

$$i_b: U_{vh} = i_b \cdot r_{be} + i_b (\beta + 1) R_{E1} \Rightarrow i_b = \frac{U_{vh}}{r_{be} + (\beta + 1) R_{E1}}$$

$$\Rightarrow i_{vh} = U_{vh} \cdot \left(\frac{1}{r_{be} + (\beta + 1) R_{E1}} + \frac{1}{R_{12}} \right) \Rightarrow R_{vh} = \left(\frac{1}{r_{be} + (\beta + 1) R_{E1}} + \frac{1}{R_{12}} \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow R_{vh} = R_{12} \parallel (r_{be} + (\beta + 1) R_{E1})$$

$$R_{izh} = R_c = 1.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_{vh} = 1.8 \text{ k}\Omega$$

↳ dobili smo enak rezultat

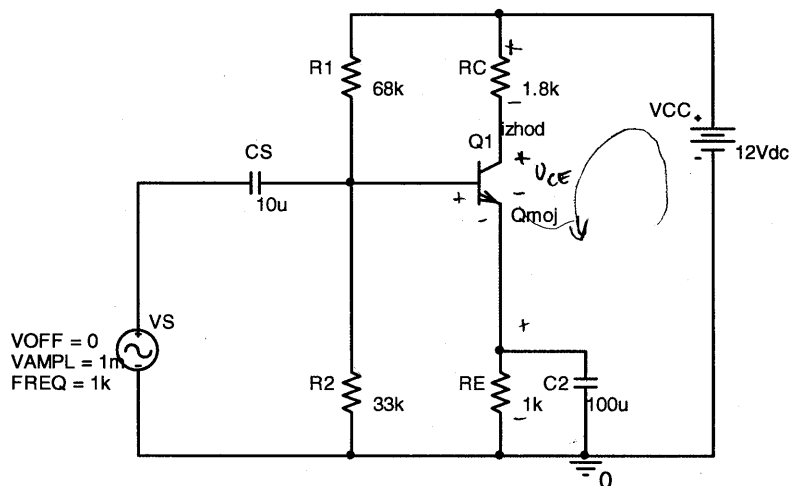
$$A_{us} = \frac{U_2}{U_s} = \dots \text{izpeljali na vajah} = - \frac{R_c \cdot g_m}{1 + R_{E1} \cdot g_m} \approx - \frac{R_c}{R_{E1}} = \underline{-18}$$

Bipolarni tranzistor v orientaciji skupni emitor

Namen vaje:

- časovna analiza ojačevalnika z bipolarnim tranzistorjem v orientaciji skupni emitor
- izračun delovne točke
- malosignalna analiza bipolarnega tranzistorja pri srednjih frekvencah
- inkrementalni model bipolarnega tranzistorja

Vežje 1: Bipolarni npn transistor v orientaciji skupni emitor

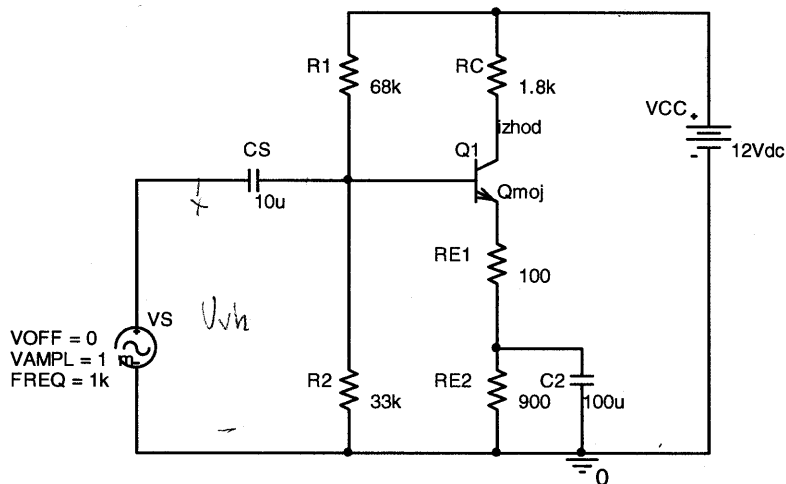


Podatki vezja: $U_{CC} = 12\text{ V}$, $R_1 = 68\text{ k}\Omega$, $R_2 = 33\text{ k}\Omega$, $R_C = 1,8\text{ k}\Omega$, $R_E = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 120$, $U_{BE} = 0,7\text{ V}$

Naloge:

1. Izračunajte delovno točko vezja.
2. Izračunajte vhodno impedanco, izhodno impedanco ter malosignalno napetostno ojačanje A_{us} (u_2/u_s) vezja.
3. Sestavite vezje v programu Capture., Schematics. Elementi vezja: C, R, VDC, VSIN, Q2N3904, 0. Izmenični vir VSIN ima naslednje parametre: amplituda 1 mV, frekvenca 1 kHz.
4. Priredite model tranzistorja: `.model Qmoj NPN (Is=12f Bf=120 Br=0.7)`
5. Izvršite izračun delovne točke (*bias point*). Rezultate preverite z izračunanimi.
6. Izvršite tranzientno analizo (*tran*). Tranzientna analiza se izvede v časovnem prostoru. Traja naj tri periode vhodnega signala, v periodi pa naj bo sto izračunanih točk.
7. Upor $R_E = 1\text{ k}\Omega$ razdelite na $R_{E1} = 100\ \Omega$ ter $R_{E2} = 900\ \Omega$. Ponovite naloge 1.- 6.

Vezje 2: Modificirana orientacija s skupnim emitorjem



Elektronika TK – 1.del
Laboratorijska vaja 3

Naloge:

1. Vezje 1: $R_E = 1\text{ k}\Omega$

Izračun:

PSpice:

$U_{CE} = 4.4\text{ V}$ $I_C = 2.72\text{ mA}$

$U_{CE} = 4.366\text{ V}$ $I_C = 2.719\text{ mA}$

$A_{us} = 180$
 $Z_{vh} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta \cdot R_E = 1.8\text{ k}\Omega$ $Z_{izh} = R_C$

$A_{us} = 180$

2. Vezje 2: $R_{E1} = 100\ \Omega$ in $R_{E2} = 900\ \Omega$

Izračun:

PSpice:

$U_{CE} = 4.4\text{ V}$ $I_C = 2.72$

$U_{CE} = 4.366\text{ V}$ $I_C = 2.719\text{ mA}$

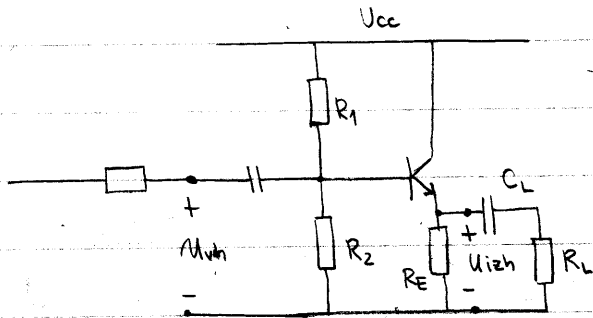
$A_{us} = -18$
 $Z_{vh} = 1.8\ \Omega$ $Z_{izh} = R_C$

$A_{us} = -17$

$\rightarrow R_2 \parallel (R_{be} + (\beta + 1) R_{E1})$
2

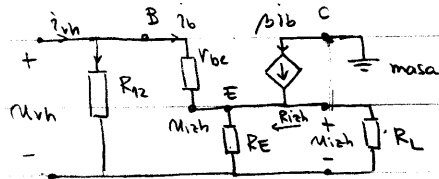
PRIPRAVA na 4. Lab. VAJO :

• Veže v orientaciji skupni kolektor:



!!! Zanima nas malosignalna analiza: R_{vh} , R_{vzh} , A_u .

• Nadomestno vezje:



!!! Tisto vozlišče, ki ima sponto na masi ... po njem vemo za katero orientacijo gre. V našem primeru je to kolektor!

$R_{vh} = ?$, $R_{vzh} = ?$, $A_u = ?$

$$A_u = \frac{U_{vzh}}{U_{vh}} ; \quad M_{vzh} = i_b (\beta + 1) (R_E \parallel R_L) =$$

$$\stackrel{?}{=} \frac{U_{vh} - U_{vzh}}{r_{be}} \cdot \beta \cdot (R_E \parallel R_L) =$$

$$= \frac{U_{vh} - U_{vzh}}{\beta} \cdot g_m \cdot \beta (R_E \parallel R_L) =$$

$$= g_m (U_{vh} - U_{vzh}) (R_E \parallel R_L) = g_m (U_{vh} - U_{vzh}) \cdot R_{EL}$$

$$r_{be} = \sqrt{\beta} / g_m$$

$$\Rightarrow M_{vzh} = g_m \cdot R_{EL} \cdot U_{vh} - g_m R_{EL} \cdot U_{vzh}$$

$$\Rightarrow M_{vzh} (1 + g_m R_{EL}) = g_m \cdot R_{EL} \cdot U_{vh} \Rightarrow M_{vzh} = \frac{g_m \cdot R_{EL} \cdot U_{vh}}{1 + g_m R_{EL}}$$

$$\Rightarrow A_u = \frac{g_m \cdot R_{EL}}{1 + g_m R_{EL}} = \frac{R_{EL}}{\frac{1}{g_m} + R_{EL}} = \frac{R_E \parallel R_L}{\frac{1}{g_m} + (R_E \parallel R_L)} \approx 1$$

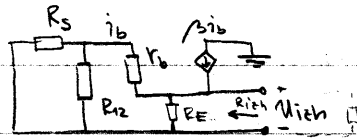
↳ V orientaciji skupni kolektor bo napetostno ojačanje vedno okoli 1 oz. malo manj od 1!

$$R_{vh} = \frac{U_{vh}}{i_{vh}} \quad ; \quad i_{vh} = i_{R2} + i_b = \frac{U_{vh}}{R_{v2}} + \frac{U_{vh} - U_{vzh}}{r_{be}}$$

$$R_{vh} = \left(\frac{1}{R_{v2}} + \frac{1}{r_{be}} - \frac{g_m \cdot R_{EL}}{r_{be} (1 + g_m R_{EL})} \right)^{-1} = \dots = \left(\frac{1}{R_{v2}} + \frac{1}{r_{be} + \beta R_{EL}} \right)^{-1} = R_{v2} \parallel (r_{be} + \beta R_{EL})$$

R_{izh}: nadomestno vezje:

$$R_{izh} = \frac{M_{izh}}{I_{izh}}$$



$$R_{izh} = R_E \parallel \left((r_{be} + (R_2 \parallel R_s)) / (\beta + 1) \right)$$

Naloz:

1.

Izračun:

PSpice:

$U_{CE} = 15V$ $I_C = 3mA$

$U_{CE} = 16,45V$ $I_C = 2,71mA$

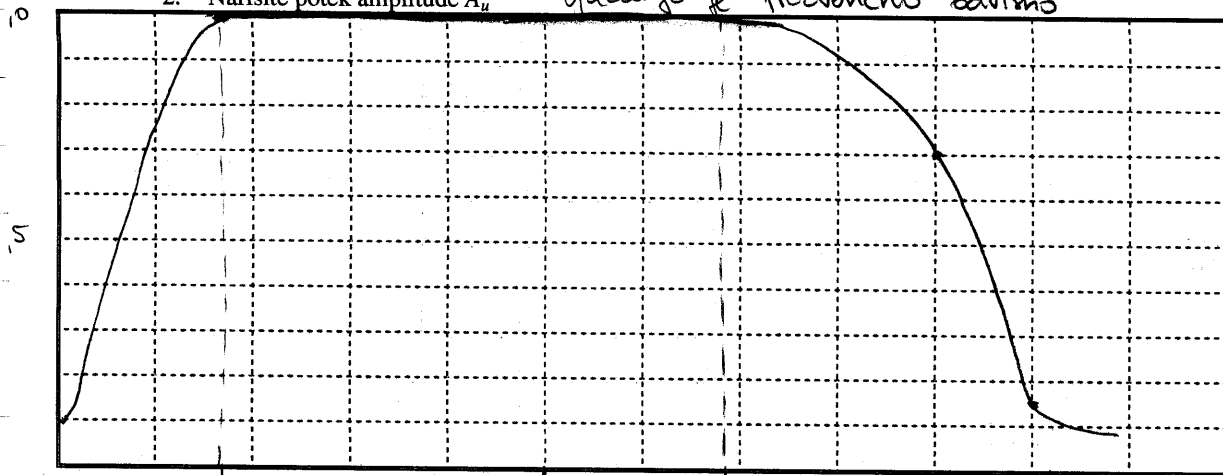
$A_{us} = 0,997$

$A_{us} = 0,996$

$Z_{vh} = 45,4k\Omega$ $Z_{izh} = 1,31k\Omega$

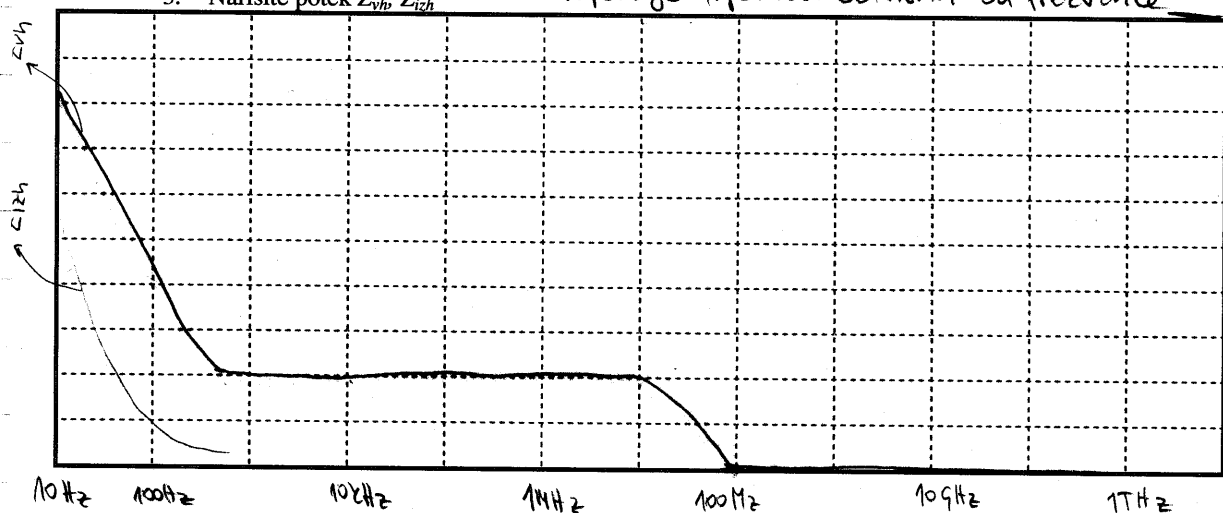
$Z_{vh} = 45,2k\Omega$ $Z_{izh} =$

2. Narišite potek amplitude A_u *Djačanje je frekvenčno odvisno*



NF 10 kHz srednje frekvence 10MHz VF 100 kHz

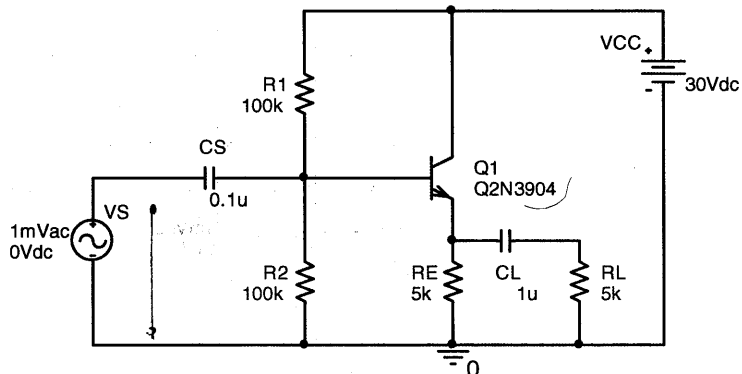
3. Narišite potek Z_{vh} , Z_{izh} *Vidimo, da je upornost odvisna od frekvence*



Namen vaje:

- frekvenčna analiza ojačevalnika z bipolarnim tranzistorjem v orientaciji skupni kolektor
- izračun delovne točke
- malosignalna analiza bipolarnega tranzistorja pri srednjih frekvencah
- določitev frekvenčnega poteka napetostnega ojačanja, vhodne impedance in izhodne impedance

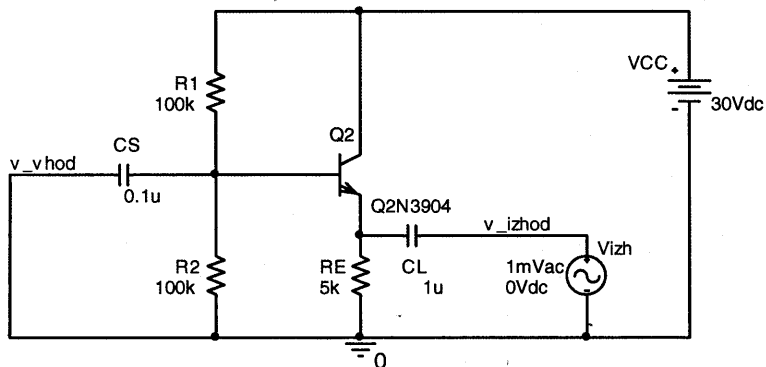
Vežje 1: Bipolarni npn transistor v orientaciji skupni kolektor



Naloge:

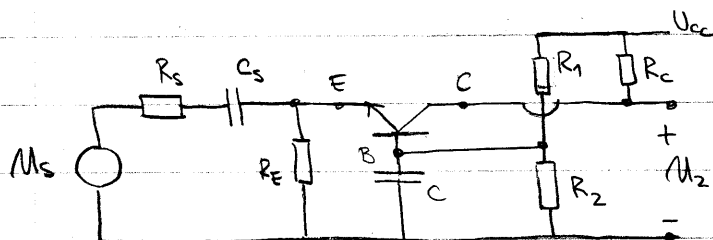
1. Izračunajte vhodno impedanco, izhodno impedanco ter malosignalno napetostno ojačanje A_{us} vezja. Pri tem upoštevajte, da je $I_C = 3\text{mA}$ in $\beta = 175$.
2. Sestavite vezje v programu Capture., Schematics. Elementi vezja: C, R, VDC, VSIN, Q2N3904, 0. Izmenični vir VAC ima naslednje parametre: amplituda 1 mV.
3. Izvršite izračun delovne točke (*bias point*).
4. Izvršite izmenično analizo (*ac*) ter določite Z_{vh} , Z_{izhv} in A_u .

Vežje 2: Vežje za določevanje poteka izhodne impedance vezja



AVDITORNE VAJE

↳ Vezje v orientaciji skupna baza:



- Kolektor ni vezan med R_1 in R_2 !

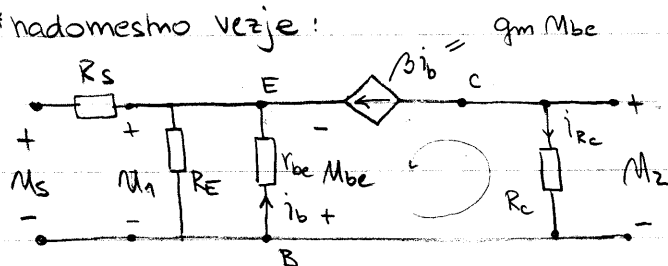
... kje so spanke tranzistorja?

... delovna točka nas ne zanima!

... Baza je na masi zato je tranzistor v orientaciji skupna baza!

→ Malosignalna analiza:

* nadomestno vezje:



$$A_M = U_2 / U_1$$

$$U_2 = i_{Rc} \cdot R_c =$$

$$= -g_m \cdot U_{be} \cdot R_c =$$

$$= g_m U_1 R_c$$

$$i_{Rc} = -\beta i_b ; \quad U_1 = -U_{be}$$

$$\Rightarrow A_M = \underline{g_m R_c}$$

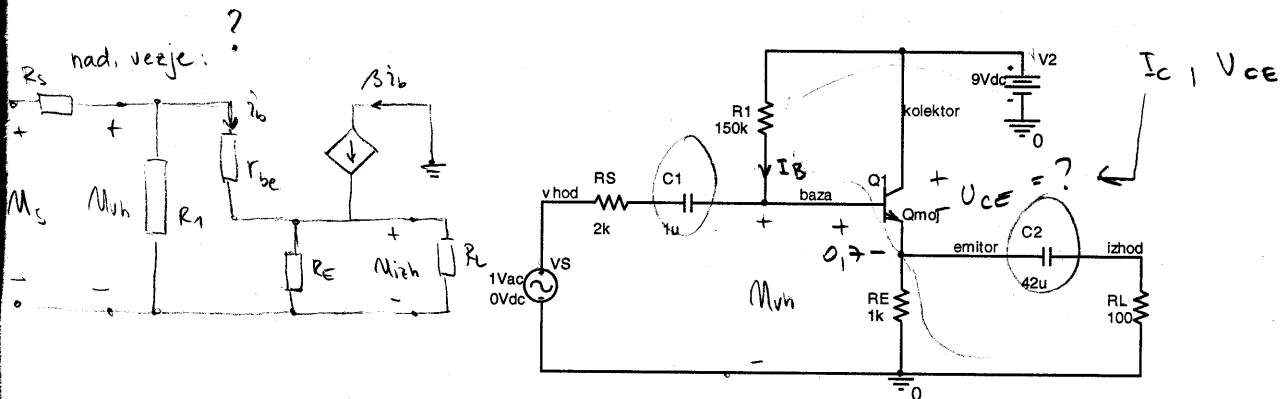
$$R_{i\text{zh}} = R_c$$

$$R_{v\text{h}} = R_E \parallel \left(\frac{r_{be}}{\beta + 1} \right)$$

Spodnja frekvenčna meja ojačevalnika

Namen:

- Analiza ojačevalnika z bipolarnim tranzistorjem v orientaciji skupna kolektor pri nizkih frekvencah.
- Vpliv kapacitivnosti na frekvenčno karakteristiko pri nizkih frekvencah.
- Izračun spodnje frekvenčne meje ojačevalnika.



Tranzistor: $\beta_F = 100$

Opis:

1. Določite velikost kondenzatorjev v vezju, da bo spodnja frekvenčna meja ojačevalnika: 30Hz, določena s C_2 .
2. Vezje simulirajte v okolju PSpice. Nastavite naslednje parametre izmenične (ac) analize: začetna frekvenca 0.01 Hz, končna frekvenca 100 kHz, 10 točk/dekado, ter logaritemsko skalo. Preverite izračunane rezultate.
3. Iz poteka faznega zasuk ugotovite fazni zasuk pri srednjih frekvencah.

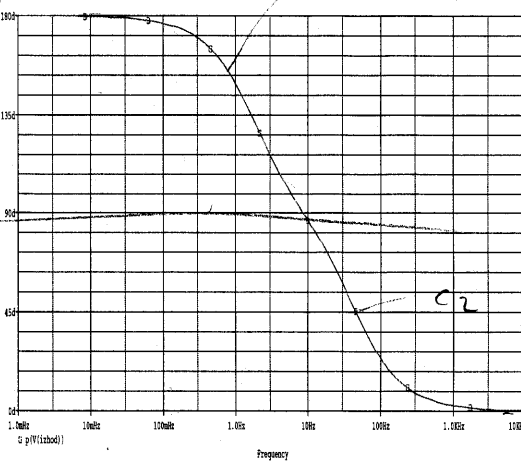
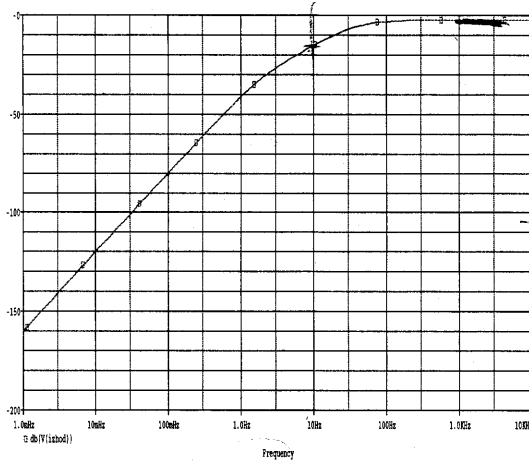
Dodatna naloga:

4. V okviru izmenične analize določite frekvenčna poteka vhodne in izhodne impedance. Kako se vrednosti pri srednjih frekvencah ujemajo z izračunanimi?

Pfaznik je car

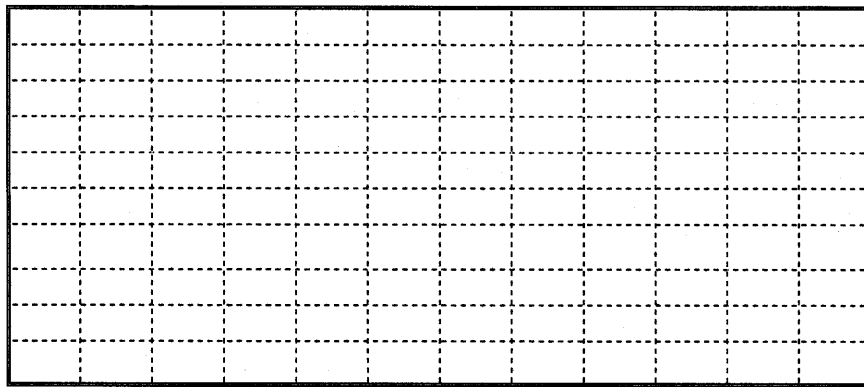
Elektronika TK - 1.del
 Laboratorijska vaja 5

$C_1 = 0,85 \mu F$ $C_2 = 42 \mu F$



C_1 $\varphi_{ol} \approx -90^\circ$

$f_{SP} (PSPICE) = 42 Hz$, $\varphi(\text{srednje fr.}) = 0^\circ$ // skupni kolektor ne invertira faze!
 sk.



$Z_{vh} = \underline{\hspace{2cm}}$, $Z_{izh} = \underline{\hspace{2cm}}$

Potocnik je cat

5. Laboratorijska vaja ~ analiza ojačevalnika pri nizkih frekvencah

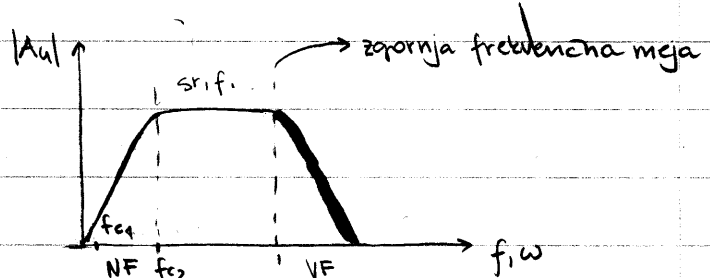
Ojačanje ni konstantno po celotnem frekvenčnem pasu ... konstantno je pri srednjih frekvencah:

C_1 je za dekada nižji od C_2 :

$$f_{c1} = \frac{1}{10} f_{c2}$$

$$f_{c1} = 3 \text{ Hz}$$

$$f_{c2} = 30 \text{ Hz}$$



od tu dalje imata C_1 in C_2 kratek stik!

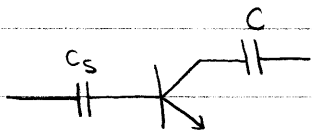
~ Naredimo grobo oceno:

Pri $0,1 f_{c2}$ (3 Hz) predstavlja C_1 kratek stik, C_2 pa predstavlja k.i.s. pri 30 Hz.

~ Odujmo od ojačevalnika bo padanje in naraščanje ojačanja ...

~ Različni kondenzatorji oblikujejo karakteristiko ojačanja

↳ $C_B, C_E, C_S, C_L, C_C, \dots$

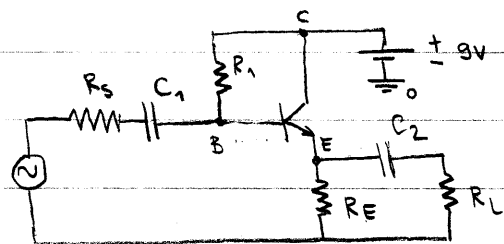


... Če imamo nek C_S na vhodu bo pri nizkih f . (transistor) deloval kot odprte spone ...? enako velja za C na izhodu ...!

~ Kje je meja? MEJNA FREKVENCA = CORNER FR. f_c

~ C_1 in C_2 bosta oblikovala del karakteristike pri NF, še več: eden izmed teh dveh kondenzatorjev bo dominanten.

ipodnja frekvenčna meja je podana, zamisli nas, katšmi sta vrednosti kondenzatorja C_1 in C_2 $\approx 30 \text{ Hz}$



to bomo rešili tako, da pogledamo vsak kondenzator (C_1 in C_2) posebej: →

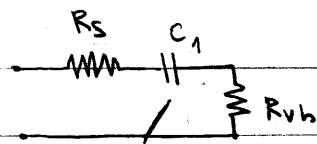
C_1 :

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_{c1} = 3 \text{ Hz}$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$R_{in} = ?$... pogledamo nadomestno vezje:



$\Rightarrow R_{in} = R_s + R_{vh}$; (R_{vh} ... glej R_{vh} za vezje s skupnim emitorjem
 $R_{vh} = R_1 \parallel (r_{be} + (\beta+1)(R_E \parallel R_L)$) \rightarrow ne upoštevamo
 R_L , zato ker C_2 pri frekvenci f_{c1} predstavlja
 odprte spone!

$$\Rightarrow R_{vh} = R_1 \parallel (r_{be} + (\beta+1) \cdot R_E) \quad \Rightarrow R_{in} = R_s + (R_1 \parallel (r_{be} + (\beta+1) R_E))$$

$$\Rightarrow f_{c1} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_s + (r_{be} + (\beta+1) R_E))} \quad \Rightarrow C_1 = \frac{1}{2\pi f_{c1} (R_s + (r_{be} + (\beta+1) R_E)) \parallel R_s}$$

$$r_{be} = \beta / g_m \quad ; \quad g_m = I_c / V_T \quad ; \quad I_c = I_B / \beta \quad ; \quad I_E \approx I_c$$

$$V_{cc} - I_B \cdot R_1 - U_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$\Rightarrow V_{cc} - I_c (R_1 / \beta + R_E) - U_{BE} = 0$$

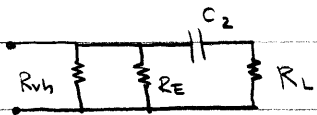
$$\Rightarrow I_c = \frac{V_{cc} - U_{BE}}{R_1 / \beta + R_E} \approx 3.3 \text{ mA} \quad (\text{PC. SPICE: } I_c \approx 3.7 \text{ mA})$$

$$\Rightarrow r_{be} \approx 0.7 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_{in} &= R_s + (R_1 \parallel (r_{be} + (\beta+1) \cdot R_E)) = \\ &= 2 \text{ k}\Omega + (150 \text{ k}\Omega \parallel (0.7 \text{ k}\Omega + 101 \text{ k}\Omega)) = \\ &= 62.6 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$\Rightarrow C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 62.6 \cdot 10^3} = \underline{\underline{0.85 \mu\text{F}}}$$

C_2 ! $f_{c2} = \frac{1}{2\pi C_2 R_2}$; $R_2 = ?$; $f_{c2} = 30 \text{ Hz}$



$R_2 = (R_{vh} \parallel R_E) + R_L$

$(R_{vh} \parallel R_E) = R_{izh}$ v vezju skupni kolektor = $[(r_{be} + (R_{i2} \parallel R_S)) / (\beta + 1)] \parallel R_E$

$\Rightarrow R_{vh} = (r_{be} + (R_{i2} \parallel R_S)) / (\beta + 1) = (0,7 + (\frac{150 + 2}{150 \cdot 2})) / 101 = 26,7 \Omega$

$\Rightarrow R_2 = 1k\Omega \parallel 26,7\Omega + 100\Omega = 126 \Omega$

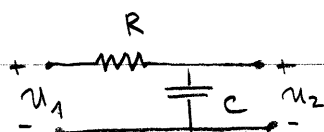
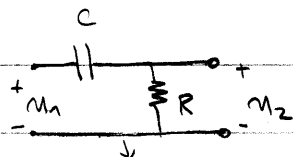
$\Rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 30 \text{ Hz} \cdot 126 \Omega} = \underline{\underline{42 \mu\text{F}}}$

\Rightarrow Nše kar smo izračunali so zgolj ocene! Mi želimo take frekvence, da se bo tranzistor na podlagi tega obnašalo (nizke) (ojačanje) in obratno!

2. D.N. (... na domači strani ...)

\hookrightarrow Nizke frekvence ; vezje v orientaciji skupni emitor ; T-model nadomestnega vezja
 - Trije kondenzatorji v vezju ... premisli kako vplivajo drug na drugega ...

POMOČ:

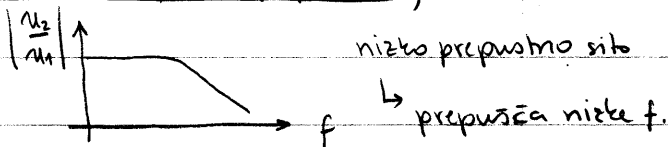
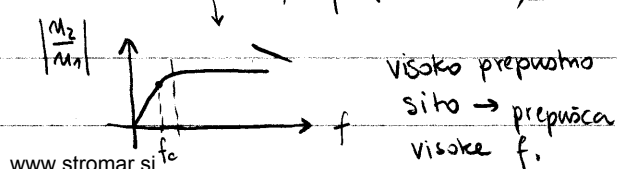


NF : (odprte sponke, ne prepušča) ;

(odprte sponke, prepušča) ;

VF : (kratek stik, prepušča) ;

(kratek stik, ne prepušča) ;



Domaća naloga

$$u_2(u_1) = Re + jIm \rightarrow \left| \frac{u_2}{u_1} \right|$$

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \iff 1 = \omega RC \rightarrow \text{takrat veja: } |u_2| = \frac{1}{\sqrt{2}} |u_1|$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{ dB} = 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{2}} = 3 \text{ dB}$$

Definiramo relativno prevajalno funkcijo: $F = \frac{A_u^{nf}}{A_u^{vf}} = \frac{(u_{vh}^{nf})}{(u_{vh}^{vf})} / \frac{(u_{vh}^{nf})}{(u_{vh}^{vf})}$
in jo izrazimo z vhodnim tokom pri nizkih in visokih f.:

$$F = \frac{I_{vh}^{nf}}{I_{vh}^{vf}} = \frac{R_1}{R_1 - j\omega C_1} = \frac{1}{1 - j(\omega R_1 C_1)} = \frac{1}{1 - jf/f_1} \quad \left| \begin{array}{l} \downarrow 2\pi f \\ \downarrow \text{nizka prevajalna f.} \end{array} \right.$$

Prevajalno funkcijo lahko izrazimo z amplitudo in faznim kotom:

$$\Rightarrow |F| = \frac{1}{\sqrt{Re^2 + Im^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_1/f)^2}} \quad \text{in} \quad \text{tg } \varphi = \frac{Im}{Re} = \frac{f_1/f}{1} = \frac{f_1}{f}$$

Pri frekvenci $f = f_1$ pade prevajalna funkcija na vrednost $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

$$\left(|F|_{f=f_1} = \frac{1}{\sqrt{1+1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{2}} = 3 \text{ dB} \right), \quad \text{fazni kot pa je}$$
$$\text{takrat } \text{tg } \varphi |_{f=f_1} = 1/1 \Rightarrow \varphi = 45^\circ$$

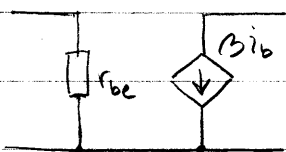
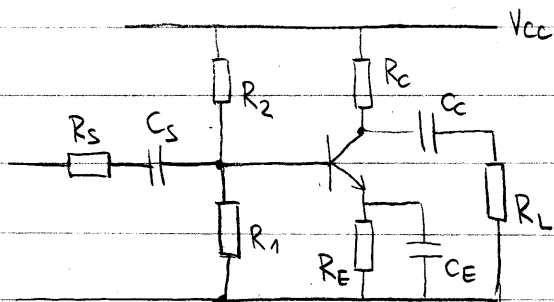
$$\left(\begin{array}{l} I_{vh}^{nf} = \frac{U_s}{R_1 + j\omega C_1} = \frac{U_s}{R_1 + j\omega C_1} \quad \text{pri NF je } X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1}, \quad \text{pri VF je } X_{C_1} = 0 \\ \Rightarrow I_{vh}^{vf} = U_s / R_1 \end{array} \right)$$

Avditorne vaje

!!! - IZPIT

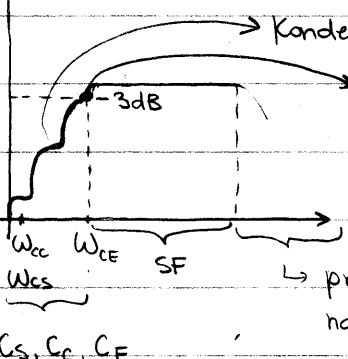
OJAČEVALNIK PRI NF:

SKUPNI EMITOR:



Malsignalni model BT pri srednjih frekvencah ... pomeni, da imamo samo rezistivne elemente (brez kondenzatorjev, ki bi vplivali na delovanje BT).

$|A_{u}|$



Kondenzatorji skreirajo neto (nelinearno) karakteristiko

Spodnja frekvenena meja (kjer amplituda ojačanja pade za 3 dB)

↳ pri VF se pojavijo t.i. parazitarne kapacitivnosti, ki vplivajo na to področje (pri analizi pride v poštev hibridni Π model)

C_s, C_c, C_E

↳ ti kondenzatorji kreirajo razmere pri NF

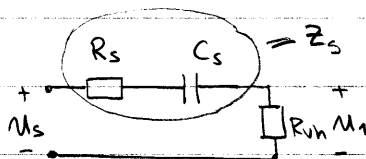
↑

(... če gledamo npr. C_E moramo frekvenci $f_{cs}(W_{cs})$ in $f_{ce}(W_{ce})$ postaviti za detado nižje od $f_{ce} = \frac{1}{2\pi \cdot W_{ce}}$

... Vsak kondenzator ima netje dominanten pol, kjer pade ojačanje na $\frac{1}{\sqrt{2}}$ oz. za 3dB)

a) Gledamo C_s

* narišemo nadomestno vezje:



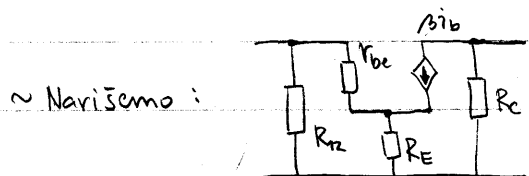
$$A_m = \frac{U_1}{U_s} ; \quad U_1 = \frac{R_{vh}}{R_{vh} + Z_s} \cdot U_s ; \quad Z_s = R_s + \frac{1}{j\omega C_s} = \frac{1 + j\omega R_s C_s}{j\omega C_s}$$

→ $A_m = \frac{j\omega C_s R_{vh}}{1 + j\omega C_s (R_{vh} + R_s)}$... iz tega lahko direktno zapišemo ω_p (omega pola) ... →

$$\Rightarrow \omega_p = \frac{1}{C_s(R_{vh} + R_s)} \rightarrow f_{c_s} = \frac{1}{2\pi C_s(R_{vh} + R_s)} ; R_{vh} = ?$$

(... To dobimo iz frekvenenega ojačevalja ... pridemo do enačnega rezultata kot že zadajšje)

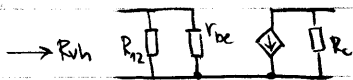
* R_{vh} ... je neodvisna od tega ali C_e prevaja ali ne. Odvisna je od tega, ali R_E prevaja ali ne oz. ali za C_E veljajo odprte sponke ali kratek stik;



Imamo dve možnosti:

1.) C_E ... odprte sponke

$$\Rightarrow R_{vh} = R_{12} \parallel (r_{be} + (\beta + 1)R_E)$$



2.) C_E ... kratek stik!

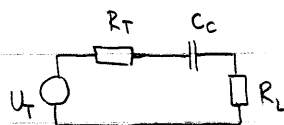
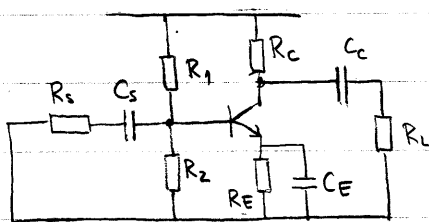
$$\Rightarrow R_{vh} = R_{12} \parallel r_{be}$$

↳ R_E ne vpliva na skupni emitor!

~ Sedaj lahko izračunamo $f_{c_{s1}}$ in $f_{c_{s2}}$... dobimo dva rezultata ... pravilen je neje vmes!

b) Gledamo C_c :

Narišemo nadomestno vezje in upoštevamo Theveninov teorem:

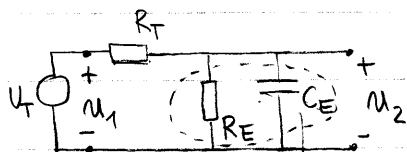


$$R_T = R_c = R_{12} \quad (\text{glej nazaj!})$$

... vidimo da R_{12} , R_s in R_E ne igrajo vloge ...

$$\Rightarrow f_{c_c} = \frac{1}{2\pi C_c(R_c + R_L)}$$

c) Gledamo C_E :

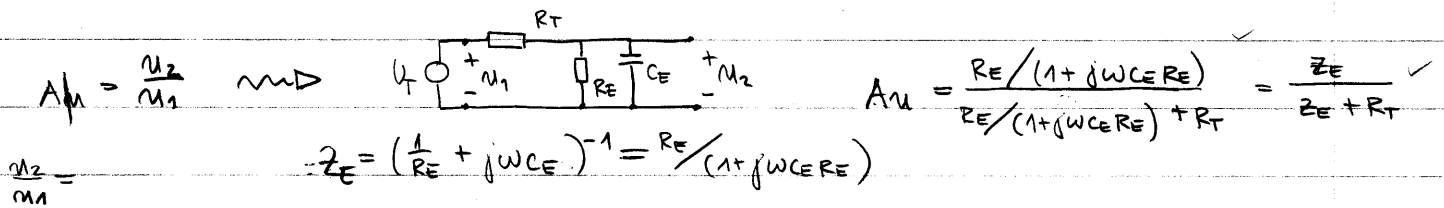
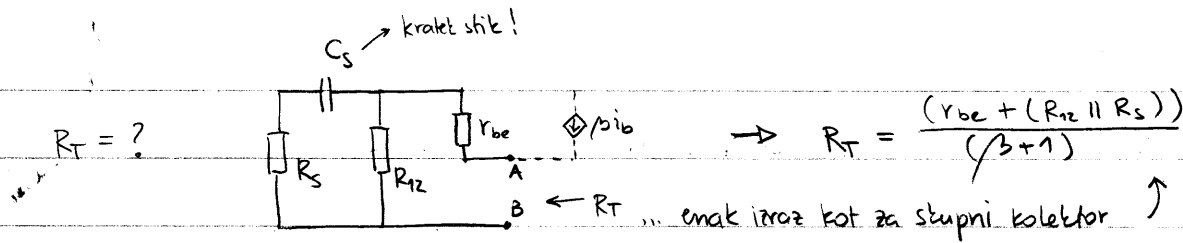


$$\frac{U_2}{U_1} = ?$$

$$f_{C_E} = \frac{1}{2\pi C_E(R_E \parallel R_T)} = \frac{1}{2\pi \tau / \omega_p}$$

↳ do tega lahko pridemo tudi preoblikovanjem sivega ojačevalja.

$$Z_E = \left(\frac{1}{R_E} + j\omega C_E \right)^{-1}$$



$$\rightarrow A_u = \frac{R_E}{(R_E + (1 + j\omega C_E R_E) R_T)} = \frac{R_E}{(R_E + R_T) (1 + j\omega \frac{R_E R_T}{R_E + R_T} C_E)} = \frac{R_E}{(R_E + R_T) (1 + j\omega (R_E \parallel R_T) C_E)}$$

$$\frac{R_E}{R_E + R_T + j\omega C_E R_E R_T}$$

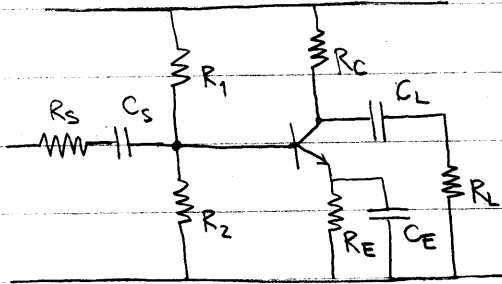
$$\rightarrow \frac{R_E}{(R_E + R_T) (1 + j\omega C_E \frac{R_E R_T}{R_E + R_T})}$$

$$\downarrow$$

$$\omega_p = \frac{1}{C_E (R_E \parallel R_T)}$$

6. lab. vaja : Zgornja frekvenca meja ojačevalnika

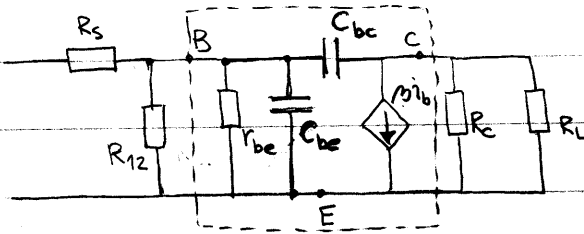
* Imamo vezje v orientaciji SE :



* Nadomestno vezje :

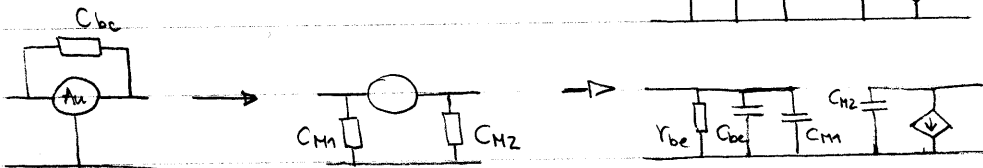
Poenostavljen hibridni

π model :



- C_{bc} in C_{be} sta paraziti kapacitivnosti med bazo in kolektorjem (C_{bc}) in med bazo in emitorjem (C_{be}), ki se pojavita pri visokih frekvencah.
- Hibridni π model lahko nekoliko predelamo za lažjo analizo. Uporabimo

MILNERJEV TEOREM :



→ Vidimo, da dobimo podobno vezje kot pri NF.

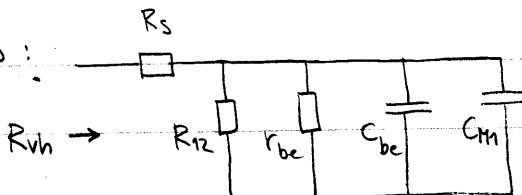
$$Y_1 = Y(1 - A_u)$$

$$Y_2 = Y \frac{A_u - 1}{A_u}$$

$$C_{M1} = C_{bc}(1 - A_u)$$

$$C_{M2} = C_{bc} \left(\frac{A_u - 1}{A_u} \right) \approx C_{bc}$$

1.) VHOD :



$$\rightarrow R_{vh} = R_{12} \parallel r_{be} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi(C_{be} + C_{M1})(R_{vh} \parallel R_s)}$$

2.) IZHOD:

$$C_{M2} \parallel R_c \parallel R_L \rightarrow R_{i2h} = R_c \parallel R_L \rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi C_{M2} (R_c \parallel R_L)}$$

* Pogledam ojačevalnik brez kapacitivnosti in dobim A_u (... to smo že izpeljali - glej nazaj!)

$$A_u = -g_m (R_c \parallel R_L)$$

$$\rightarrow C_{M1} = C_{bc} (1 + g_m (R_c \parallel R_L))$$

$$\rightarrow C_{M2} = C_{bc} \cdot \left(\frac{-g_m (R_c \parallel R_L) - 1}{-g_m (R_c \parallel R_L)} \right) \approx C_{bc}$$

* Računsko dobimo zg. frekv. mejo za ojačevalnik pri visokih frekvencah:

PODATKI: $C_{be} = C_{je} = 10 \text{ pF}$, $C_{bc} = C_{jc} = 4 \text{ pF}$, $g_m = 23 \text{ mS}$, $\beta = 100$

$$r_{be} = \beta / g_m = \frac{100 \cdot 1000}{23} \approx 4.1 \text{ k}\Omega$$

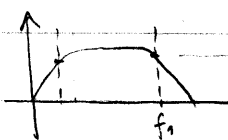
$$C_{M1} = 4 \cdot 10^{-12} (1 + 23 \cdot 10^{-3} (6.8 \parallel 10) \cdot 10^3) = \dots = 372 \text{ pF} \dots \text{ vidimo, da je } C_{M1}$$

$$C_{M2} \approx C_{bc} = 4 \text{ pF}$$

ki spada k vходу,

dominanten (vhod dominira)

$$f_1 = \frac{1}{2\pi (C_{be} + C_{M1}) (R_{vh} \parallel R_s)} = \frac{1}{2\pi (C_{be} + C_{M1}) ((R_{i2} \parallel r_{be}) \parallel R_s)} = \dots = \underline{417 \text{ kHz}}$$

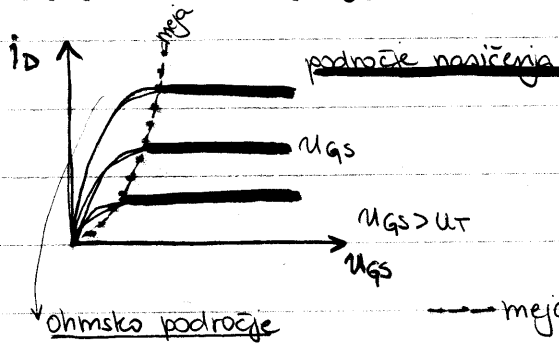


→ To je zgornja frekv. meja!

$$f_2 = \frac{1}{2\pi C_{bc} R_c \parallel R_L} = \dots = \underline{9.95 \text{ MHz}}$$

MOS tranzistor v orientaciji skupni izvor

! Karakteristika:



U_T ... pragovna napetost

$$U_{DS} = U_{GS} - U_T$$

→ ohmsko področje ... $U_{DS} < U_{GS} - U_T$

→ področje nasičenja ... $U_{DS} > U_{GS} - U_T$

I_D ... tok ponora

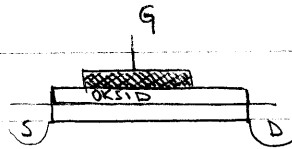
$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

$$k = \frac{\mu C_{ox} W}{2L}$$

MOS TRANZISTOR:



n-tip



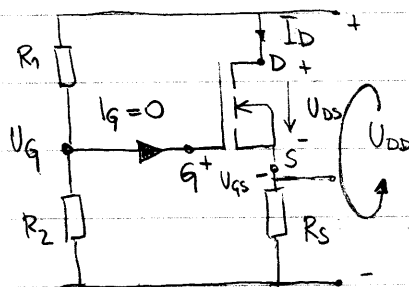
PRIMER: Imamo vezje, ki je enako kot n primerih, ki smo jih delali pri bipolarnem tranzistorju ... zdaj imamo enako vezje, a drug tranzistor.

Na začetku smo pri BT računali napetost baze ... z napetostnim delilnikom, potem pa smo uporabili Theveninov tokem...

DELOVNA TOČKA:

Podobno se naloge lotimo sedaj:

U_{DS}
narobe
je marisano!



$U_G = ?$

$$U_G = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_G = U_{GS} + \underbrace{I_D R_S}_{U_{RS}}$$

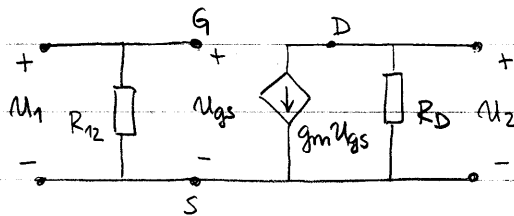
$I_D = -I_S$, ker je $I_G = 0$

→ $a \cdot U_{GS}^2 + b \cdot U_{GS} + c = 0$... izračunamo ... D.N. in dobimo dva rezultata ... eden je > 0 od nič drugi je < 0 , ki pa ga prečrtamo, saj mora biti $U_{GS} > U_T$

Ko dobimo U_{GS} , lahko iz tega naprej izračunamo I_D !

MALOSIGNALNA ANALIZA:

* nadomestni model:



$A_{u1} = -g_m \cdot R_D$

$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = 2k(U_{GS} - U_T)$

~ Mos tranzistor nam deluje v nasičenju: $U_{DS} > U_{GS} - U_T$

~ Delovno točko izračunamo z napetostnim delilnikom

(vaja 7)

PODATKI: $\mu_n C_{ox} = 0.2 \text{ mA/V}^2$, $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $U_T = 2 \text{ V}$, $U_{DD} = 18 \text{ V}$
 $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_S = 3 \text{ k}\Omega$

a) DELOVNA TOČKA (I_D, U_{DS}):

Tok v sponko vrat je enak 0, tok ponora pa je enak $I_D = k(U_{GS} - U_T)^2$...

-tranzistor deluje v področju nasičenja...

$k = \frac{0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}^2 = 1 \text{ mA/V}^2$

$U_G = U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 18 \text{ V} \cdot \frac{1}{3} = 6 \text{ V}$

$k \cdot R_S = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 = 3$

$U_G = U_{GS} + k(U_{GS} - U_T)^2 \cdot R_S \rightarrow U_G = U_{GS} + k(U_{GS}^2 - 2U_{GS}U_T + U_T^2) R_S$

$\rightarrow U_G = U_{GS} + 3U_{GS}^2 - 2 \cdot 3U_{GS}U_T + 3U_T^2$

$$\rightarrow U_G - 3U_T^2 = 3U_{GS}^2 + U_{GS}(1 - 2 \cdot 3 \cdot U_T)$$

$$\rightarrow 3U_{GS}^2 + U_{GS}(1 - 6 \cdot U_T) - U_G + 3U_T^2 = 0 \dots \text{vstavimo znane veličine}$$

$$\rightarrow 3U_{GS}^2 + U_{GS}(1 - 12) - 6 + 3 \cdot 4 = 0$$

$$\rightarrow 3U_{GS}^2 - 11U_{GS} + 6 = 0$$

$$\rightarrow U_{GS1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{11 \pm \sqrt{121 - 72}}{6} = \frac{11 \pm 7}{6}$$

$$U_{GS1} = \frac{11+7}{6} = \underline{3V} \quad ; \quad U_{GS2} = \frac{2}{3}V \quad \text{ta rešitev ni prava } U_{GS} \text{ mora biti večji od } U_T (2V) !$$

$$\rightarrow U_{GS} = \underline{3V} \quad U_{DS} > 1V \dots \text{za področje nasičenja}$$

$$\rightarrow I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 = 1 \cdot 10^{-3} (3V - 2V)^2 \cdot A/V^2 = \underline{1mA}$$

$$U_{DD} - R_D \cdot I_D - U_{DS} - I_D \cdot R_S = 0$$

$$U_{DD} - I_D (R_D + R_S) = U_{DS}$$

$$U_{DS} = 18V - 1mA (13k\Omega) = 18V - 13V = \underline{5V}$$

$5V > 1V \dots$ vidimo, da je tranzistor res v območju nasičenja

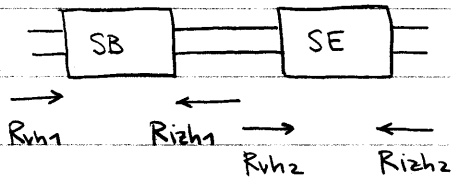
• malosignalna analiza:

$$g_m = 2 \cdot k (U_{GS} - U_T) = 2 \cdot 10^{-3} A/V^2 (1V) = \underline{2mS} \quad s = \frac{1}{\omega}$$

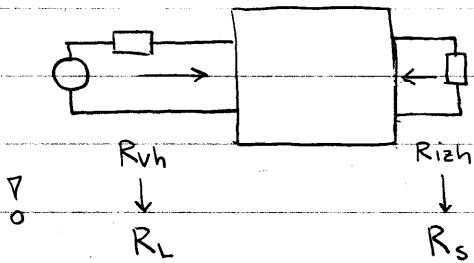
$$A_m = -g_m \cdot R_D = \underline{20}$$

SKUPNI EMITOR - SKUPNI KOLEKTOR (SE - SK)

- Malosignalna analiza dvostopenjskega glavevalnika z bipolarnim tranzistorjem v orientaciji skupni emitor - skupni kolektor.

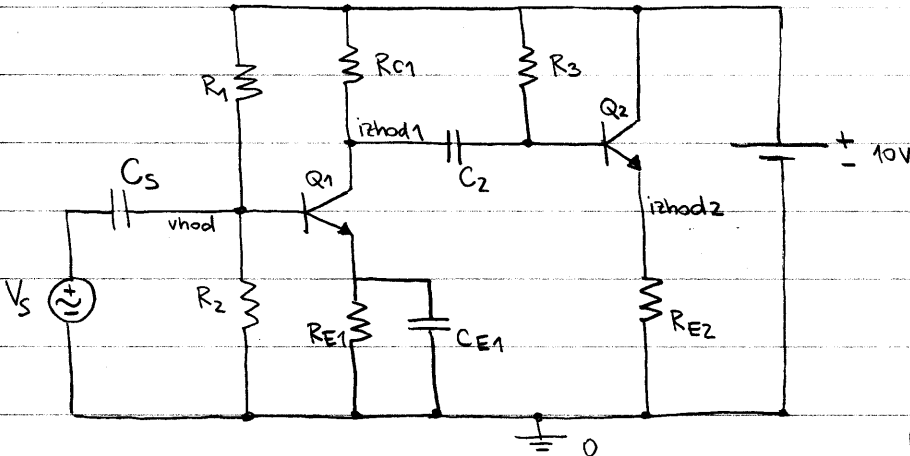


$$A_{ul} = A_{u1} \cdot A_{u2}$$



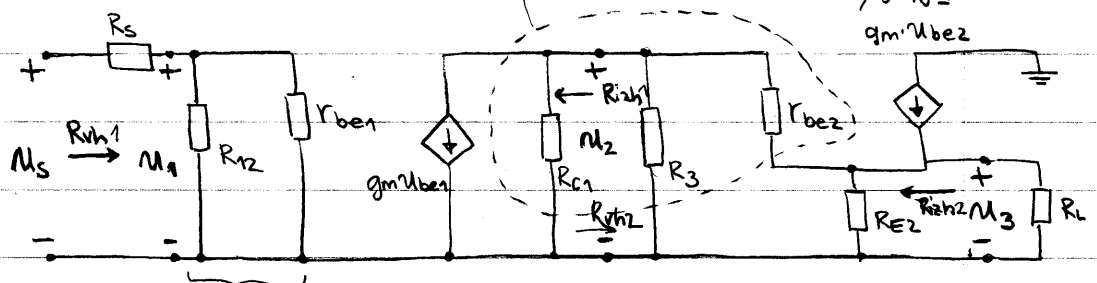
(Pomembno je, da vidimo še naslednjo stopnjo motor)

Vežje (vaja 8)



$$R_{ih2} = R_{L1}$$

• Nadomestno vežje:



- izpitne naloge: 1x deli točka
- 1x malosignalna analiza
- 1x nizke frekvence
- 2x visoke -11-

$$R_{vh} = R_{vh1} = R_{v2} \parallel r_{be1}$$

$$R_{izh} = R_{izh2} = R_{E2} \parallel \frac{r_{be2} + (R_3 \parallel R_{izh1})}{\beta + 1}$$

$$R_{izh1} = R_{c1}$$

$$\underline{A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}} \quad ; \quad A_{u2} \approx 1$$

$$\Rightarrow \underline{A_{u1}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-g_m \cdot U_{be} (R_c \parallel R_{vh2})}{U_{be1}} = \underline{-g_m (R_c \parallel R_{vh2})}$$

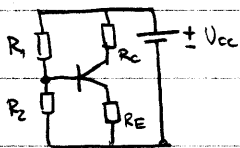
$$R_{vh2} = R_3 \parallel (r_{be2} + R_{E2} (\beta + 1))$$

- Poslji še enkrat VPRAŠANJA PSTK še enkrat ZAJCU! ✓
- Poslji izpit za elektroniko na mehu!!! ✓
- R.1. Ob 15h vprašanja za izpit! // ✓

Vaje

Delovna točka in napajalna vezja bipolarnih tranzistorjev:

①



$$I_c, V_{CE} = ?$$

⇒ Delovno točko lahko poiščemo na dva načina:

- 1.) I_B zanemarimo
- 2.) I_B ne zanemarimo

$$\hookrightarrow I_B \ll I_{R2}$$

$$1.) \quad U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{CC} ;$$

$$U_B = U_{BE} + I_E \cdot R_E \quad \Rightarrow \quad I_E \approx I_C = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \quad \dots \text{če zanemarimo vpliv}$$

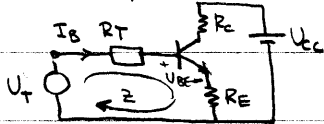
I_B , potem je I_C neodvisen od faktorja β .

2.) Upoštevamo vpliv I_B :

• Nvod vezja preoblikujemo s pomočjo Theveninovega teorema:

$$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC} ; \quad R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

• Z uporabo Theveninovega nadomestnega vezja zapišemo:



$$\Rightarrow U_T = R_T \cdot I_B + U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_C = (\beta + 1) I_B$$

↳ ponavadi zanemarimo

$$I_E \approx I_C \approx \beta \cdot I_B$$

$$\Rightarrow U_T = I_C \left(\frac{R_T}{\beta} + R_E \right) + U_{BE}$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{U_T - U_{BE}}{\frac{R_T}{\beta} + R_E}$$

$$-U_{CC} + I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E = 0$$

$$\Rightarrow U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad \dots \text{v ta izraz vstavimo tok } I_C$$

* Vidimo tudi, da sta si izraza za I_C dokaj podobna ... Nažalost velja, da je $\frac{R_T}{\beta} \ll R_E$ (še posebej, ko je vpliv I_B zelo majhen). Naloga nam omogoča reševanje tako, da upoštevamo tok I_B .

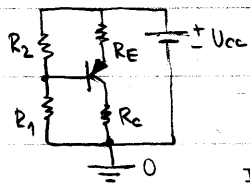
② V izraze vstavimo dane vrednosti → vidimo da opreminjenosti

faktorja β nima velikega vpliva (cca 3%) ... to drži le taktat, ko velja $\frac{R_T}{\beta} \ll R_E!$

3) V izraz za kolektorski tok I_c vstavimo oblike vrednosti:

Vidimo, da pogoj $R_T/\beta \ll R_E$ ni izpolnjen. V tem primeru ima faktor β oz. njegova sprememba vpliv na končni rezultat (cca 24%), zato bazegega toka I_B ne smemo zanemariti! Iz tega zaključimo tudi, da je stabilnost povezane z uporabo napetostnega delilnika ($R_T = R_1 R_2$) v primerjavi z R_E .

4) Določite delovno točko (I_c, U_{CE}) pnp tranzistorja: (skupni kolektor?)

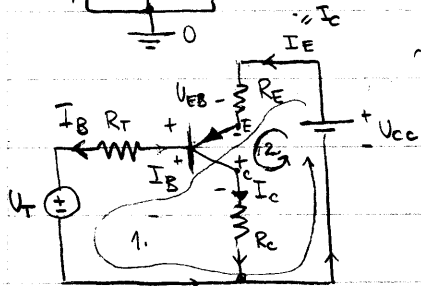


$$\Rightarrow U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{cc} ; R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

1.)

$$\Rightarrow -U_{cc} + I_E R_E - U_{BE} + I_B R_T + U_T = 0$$

$U_{BE} = 0.7V$



$$(I_E = I_B + I_C)$$

$$\Rightarrow I_E (R_E + R_T/\beta) = U_{cc} - U_{BE} - U_T$$

$$\Rightarrow I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE} - U_T}{R_E + R_T/\beta} ; \beta \gg 1$$

2.)

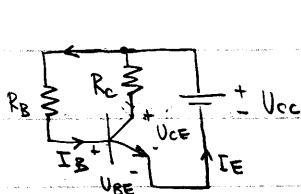
$$\Rightarrow -U_{cc} + I_c R_E - U_{CE} + I_c R_C = 0$$

$$\Rightarrow U_{CE} = U_{cc} - I_c (R_E + R_C)$$

5) V izrazje iz prejšnje naloge vstavimo vrednosti:

(I_c je reda 10^{-3} , U_{CE} pa reda 10^0)

6) I_c in $U_{CE} = ?$



$$\Rightarrow -U_{cc} + I_B R_B + U_{BE} = 0$$

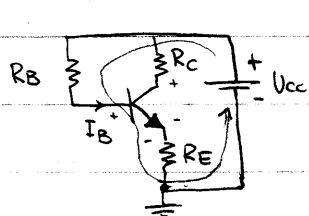
$$\Rightarrow I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{R_B/\beta}$$

$$\Rightarrow -U_{cc} + I_c R_C + U_{CE} = 0 \Rightarrow U_{CE} = U_{cc} - I_c R_C$$

⑦ Za vezje iz prejšnje naloge postavimo dane vrednosti in izračunamo I_c in U_{CE} .

Factor β se spreminja od 80 do 240 ... V primeru, ko je $\beta = 240$ je tranzistor v nasičenju ($I_c = 4.24 \text{ mA}$, $U_{CE} = -0.328 \text{ V}$) ... izračunani vrednosti za tok in napetost v realnem vezju nista možni! Tranzistor ne deluje več kot pojačevalnik.

⑧ $I_c = ?$

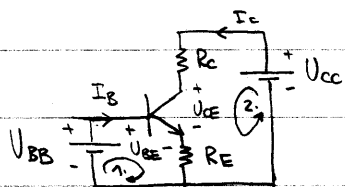


$$-U_{cc} + I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = 0$$

$$\Rightarrow I_c (R_E + R_B/\beta) = U_{cc} - U_{BE}$$

$$I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{R_E + R_B/\beta}$$

⑨ I_c in $U_{CE} = ?$



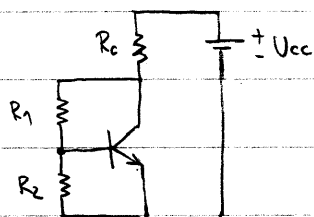
$$I_E \approx I_c \Rightarrow I_c = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

1) $U_{BB} = U_{BE} + I_E \cdot R_E$

2) $-U_{cc} + I_c R_c + U_{CE} + I_E R_E = 0$

$$\Rightarrow U_{CE} = U_{cc} - I_c (R_c + R_E)$$

⑩ I_c , $U_{CE} = ?$ (vezje z enim virom in povratnim sklopom)



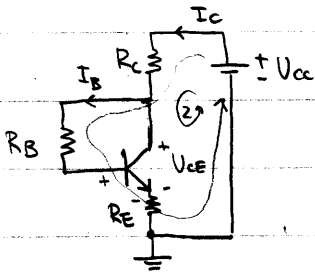
!!!
Mirovna izhodna napetost U_{CE} je ponavadi nastavljena na polovico napajalne napetosti ($U_{CE} = U_{cc}/2$). Povratni sklop mora zagotoviti delilnik mirovne napetosti v razmerju:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_{BE}}{U_{cc}} = \frac{U_{BE}}{U_{cc}/2} \quad ; \quad I_c = \frac{U_{cc} - U_{CE}}{R_c} = \frac{U_{cc}}{2R_c}$$

$$-U_{cc} + I_c R_c + U_{CE} = 0$$

$$-U_{cc} (1 - 1/2) + I_c R_c = 0 \Rightarrow I_c = \frac{U_{cc}}{2R_c}$$

11.) I_c in $U_{CE} = ?$ (en vir in povratni sklop):



1.) $-U_{cc} + I_c \cdot R_c + I_B \cdot R_B + U_{BE} + I_E R_E = 0$

$\rightarrow I_c (R_c + R_E + R_B/\beta) = U_{cc} - U_{BE}$

$\rightarrow I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{(R_c + R_E + R_B/\beta)}$

2.) $-U_{cc} + I_c \cdot R_c + U_{CE} + I_E R_E = 0$

$\rightarrow U_{CE} = U_{cc} - I_c (R_c + R_E)$

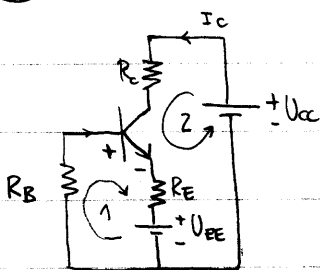
• Če za R_c izberemo (ponavadi) $R_c = R_B/\beta$ potem je $I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{2R_c + R_B}$

12.) Za vezje iz zgornje naloge postavimo prednosti in izračunamo kolektorški tok, ki je odvisen od faktorja β :

β se spreminja od 80 do 240 $\rightarrow I_c|_{\beta=80} = 1.54 \text{ mA}$; $I_c|_{\beta=240} = 2.18 \text{ mA}$

\rightarrow Kot vidimo se kolektorški tok bistveno ne spremeni (cca 0.6 mA ... rede 10^{-4}).

13.) I_c in $U_{CE} = ?$ (napajalno vezje R dvema viroma):



1.) $-R_B I_B + U_{BE} + I_E R_E + U_{EE} = 0$

$\rightarrow I_c (R_B/\beta + R_E) = -U_{EE} - U_{BE}$

$\rightarrow I_c = \frac{-U_{EE} - U_{BE}}{R_B/\beta + R_E}$

2.) $-U_{cc} + I_c \cdot R_c + U_{CE} + I_E \cdot R_E + U_{EE} = 0$

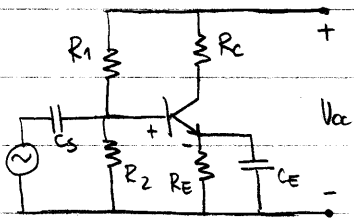
$\rightarrow U_{CE} = U_{cc} - U_{EE} - I_c (R_c + R_E)$

14.) Za vezje iz prejšnje naloge postavimo konkretne prednosti in izračunamo I_c in U_{CE} .

$I_c = 4.56 \text{ mA}$; $U_{CE} = 11.7 \text{ V}$

Malosignalna analiza vezij z bipolarnim tranzistorjem

15. Za podano vezje določite Z_{in} , Z_{izh} in A_{u1} pri srednjih frekvencah, če je $\beta = 150$.



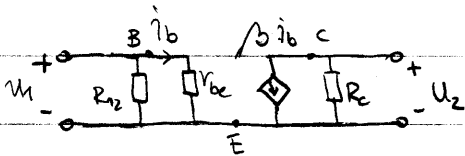
1.) Določimo delovno točko I_C in U_{CE} :

$$\rightarrow U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{cc} \quad \text{in} \quad R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_T = I_B \cdot R_T + U_{BE} + I_E R_E \quad \approx I_C$$

$$\rightarrow I_C = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T/\beta + R_E}$$

2.) Narišemo nadomestno vezje za malosignalno analizo:



$$g_m = I_C / U_T$$

U_T ... termična napetost

$$r_{be} = \beta / g_m$$

$$\beta i_b = I_C = g_m \cdot U_T$$

$$R_{vh} = R_{12} \parallel r_{be}$$

$$R_{izh} = R_c$$

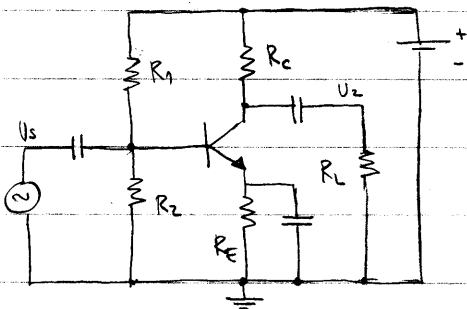
3.) $A_{u1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-\beta i_b \cdot R_c}{\beta i_b / g_m} = -R_c \cdot g_m$... g_m je

$$M_1 = i_b \cdot r_{be} = i_b \cdot \beta / g_m$$

$$M_2 = -\beta i_b \cdot R_c$$

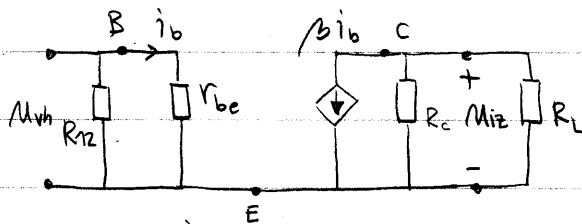
skupni emitor invertira fazo!

16. Za podano vezje z bremenskim uporom R_L določite izraz za A_{u1}



(skupni emitor!)

nadomestno vezje za malosignalno analizo:



$$M_1 = M_1$$

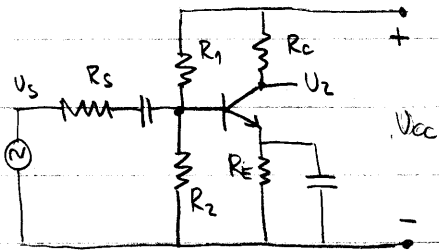
$$M_2 = U_2$$

$$M_1 = U_{be} = r_{be} \cdot i_b$$

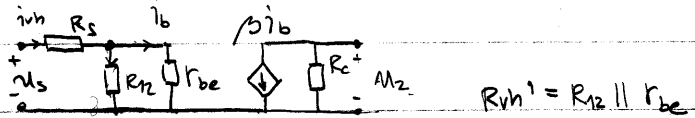
$$M_2 = -\beta i_b (R_c \parallel R_L)$$

$$\rightarrow A_{u1} = \frac{M_2}{M_1} = -g_m (R_c \parallel R_L)$$

17. Za podano vezje z bremenstvim napajanjem R_S določite A_{us} :



• nadomestni model:



$$R_{vh}' = R_{12} \parallel r_{be}$$

$$A_{us} = \frac{u_2}{u_s}$$

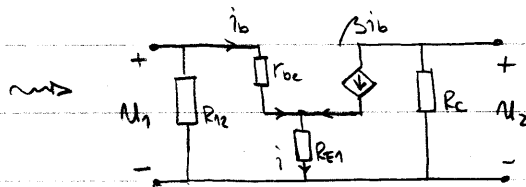
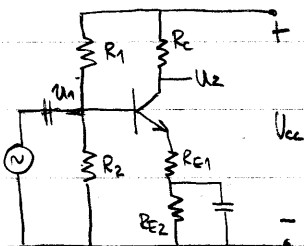
$$\rightarrow A_{us} = -g_m \cdot R_C \cdot \frac{R_{vh}'}{R_{vh}' + R_S}$$

$$u_2 = -R_C \beta i_b$$

$$\begin{aligned} u_s &= i_{vh} (R_S + R_{vh}') = (i_b + i_{R_{12}}) (R_S + R_{vh}') = \\ &= \left(i_b + \frac{i_b r_{be}}{R_{12}} \right) (R_S + R_{vh}') = i_b \cdot r_{be} \left(\frac{1}{r_{be}} + \frac{1}{R_{12}} \right) (R_S + R_{vh}') \\ &= i_b \cdot r_{be} \cdot (R_{vh}')^{-1} \cdot (R_S + R_{vh}') \end{aligned}$$

$$u_s = R_S \cdot i_{vh} + i_{R_{12}} \cdot R_{12}$$

18. Za podano vezje z bremenstvim napajanjem R_{E2} določite izraze za R_{vh} , R_{zh} in A_u .



$$u_2 = -\beta i_b R_C$$

$$i = i_b (\beta + 1)$$

$$u_1 = i_b \cdot r_{be} + R_{E1} \cdot i_b (\beta + 1) = i_b (r_{be} + R_{E1} (\beta + 1))$$

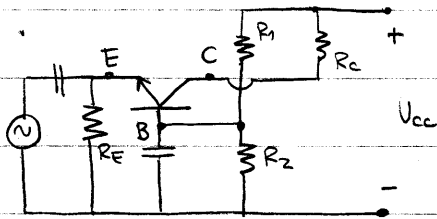
$$\rightarrow A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-\beta R_C}{r_{be} + R_{E1} (\beta + 1)} = -g_m \frac{R_C}{1 + \frac{R_{E1} (\beta + 1)}{r_{be}}} = \frac{-R_C}{\frac{1}{g_m} + \frac{R_{E1} \beta}{r_{be} \cdot g_m}} = \frac{-R_C}{\frac{1}{g_m} + R_{E1}}$$

$(\beta + 1 \approx \beta)$

$$R_{zh} = R_C$$

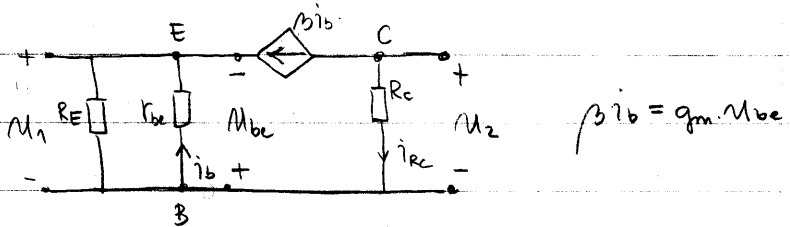
$$R_{vh} = R_{12} \parallel (r_{be} + R_{E1} (\beta + 1))$$

19) Za oprevalnik s skupno bazo določite R_{vh} , R_{vh} in A_u :



→ kolektor mi vezan med R_1 in R_2

→ nadomestno vezje za malosignalno analizo:



$$R_{vh} = R_E \parallel \frac{r_{be}}{\beta + 1}$$

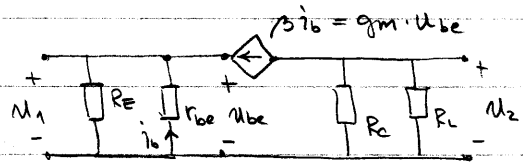
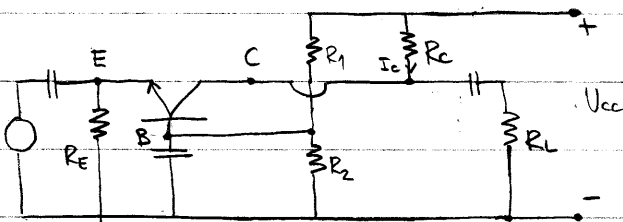
$$R_{vh} = R_C$$

$$U_1 = -U_{be} = -i_b \cdot r_{be}$$

$$U_2 = R_C \cdot i_{RC} = -R_C \beta i_b$$

$$\rightarrow A_u = R_C \beta / r_{be} = g_m R_C$$

20) Za oprevalnik izračunajte Z_{vh} in A_u , če je $\beta = 150$:



$$g_m = \frac{0.7V}{U_T} = \beta i_b$$

$$r_{be} = \beta / g_m \rightarrow g_m = \beta / r_{be}$$

$$g_m = I_c / U_T \quad ; \quad I_c = \frac{U_T - V_{BE}}{R_E + R_T / \beta} = 2mA$$

$$I_c = 2mA$$

$$g_m = I_c / U_T = 0,077 S$$

$$R_{vh} = R_E \parallel \frac{r_{be}}{\beta + 1}$$

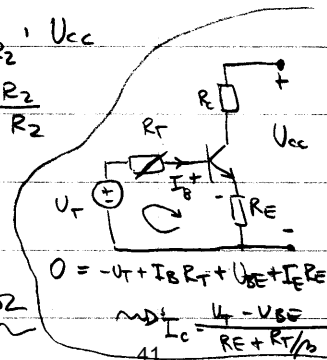
$$A_u = g_m (R_C \parallel R_L)$$

→ Theveninov teorém
Kako izračunamo

I_c oz. g_m ?

$$U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC}$$

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



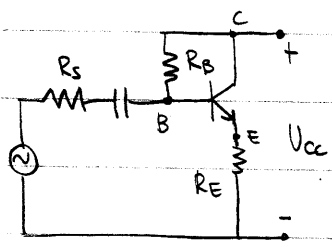
$$0 = -U_T + I_B R_T + U_{BE} + I_E R_E$$

$$\rightarrow I_c = \frac{U_T - V_{BE}}{R_E + R_T / \beta}$$

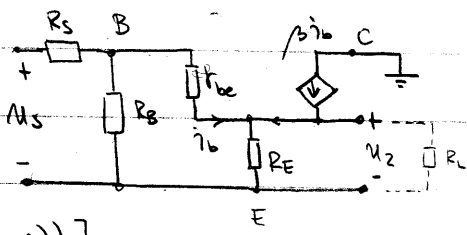
$$\rightarrow A_u = 0,077 \cdot \left(\frac{1,8 \cdot 4,7}{1,8 + 4,7} \right) \cdot 10^3 = 0,077 \cdot 1,3 \cdot 1000 = 101$$

$$\rightarrow R_{vh} = R_E \parallel \frac{1}{g_m} = \left(\frac{1}{R_E} + g_m \right)^{-1} = \left(\frac{1}{560} + 0,077 \right)^{-1} = 113 \Omega$$

21. Za optočevalnik s stupnim kolektorjem določite izraz za Z_{vh} , Z_{zh} in A_{vs} !

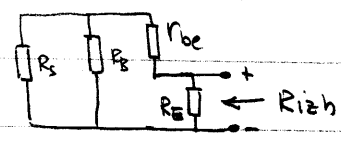


~ nadomestno vezje za malosignalno analizo



$$R_{vh} = R_S + [R_B \parallel (r_{be} + R_E(\beta + 1))]$$

$$R_{zh} = R_E \parallel [(r_{be} + (R_B \parallel R_S)) / (\beta + 1)] \rightsquigarrow$$

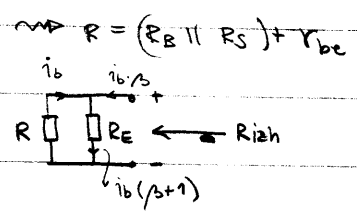


$$A_{vs} = \frac{u_z}{u_s} = \frac{(\beta + 1) R_E \cdot i_b}{r_{be} \cdot i_b + R_E (\beta + 1) i_b} =$$

$$= \frac{(\beta + 1) R_E \cdot i_b}{i_b (r_{be} + R_E (\beta + 1))} \approx \frac{\beta \cdot R_E}{r_{be} + \beta R_E} =$$

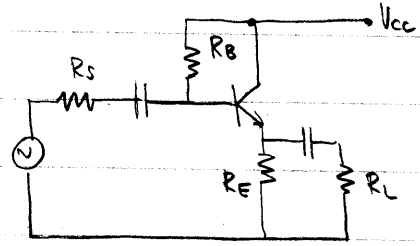
$$= \frac{R_E}{\frac{1}{g_m} + R_E} \approx 1$$

... optočevanje pri stupnem kolektorju mora biti malo pod 1!



22. Za dan optočevalnik izračunajte vrednosti, če je $\beta = 100$!

A_{vs} , Z_{vh} in Z_{zh}



$$R_{vh} = R_S + [R_B \parallel (r_{be} + (R_E \parallel R_L) \cdot (\beta + 1))] =$$

$$= 0.6 + [150 \parallel (0.8 + 4.8)] =$$

$$= 0.6 + \left[\frac{150 \cdot 5.6}{155.6} \right] = 0.6 + 5.4 = \underline{\underline{6 \text{ k}\Omega}}$$

$$r_{be} = \beta / g_m = \beta / I_c / U_T = \frac{100}{0.129} = 775.2 \Omega \approx 0.8 \text{ k}\Omega$$

$$I_c = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_E + R_B / \beta} = \frac{9 - 0.7}{1 + 1.5} \text{ mA} = \frac{8.3}{2.5} \text{ mA} = 3.3 \text{ mA}$$

$$\rightarrow g_m = 128.6 \text{ mS} = 0.129 \text{ S}$$

$$R_{zh} = R_E \parallel \frac{R}{\beta + 1} = \left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{R} \right)^{-1} =$$

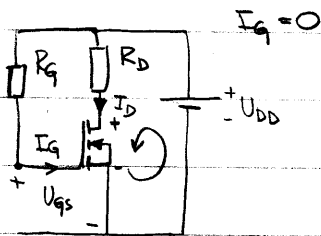
$$R = (R_B \parallel R_L) + r_{be} = 1.37 \text{ k}\Omega$$

$$= \left(\frac{1}{100} + \frac{101}{1.37} \cdot 10^{-3} \right)^{-1} = (0.075)^{-1} = \underline{\underline{13.4 \Omega}}$$

$$A_{v_{ms}} = \frac{\mu_{2}}{\mu_{s}} = \frac{R_{EL}(\beta+1) \cdot \beta}{r_{be} \cdot \beta + R_{EL}(\beta+1) \cdot \beta} = \frac{R_{EL}(\beta+1)}{r_{be} + R_{EL}(\beta+1)} = \frac{R_{EL}}{g_m + R_{EL}} \approx \frac{50}{\frac{1}{0.120} + 50} = 0.86$$

Delovna točka in napajalna vezja MOS tranzistorjev

23. Za ojačevalnik z n kanalnim MOS tranzistorjem z induciranimi kanalom izračunajte U_{GS} in R_D tako, da bo $I_D = 2 \text{ mA}$. Pragovna napetost U_T je 3 V in $U_{DD} = 20 \text{ V}$, $k = 0.1 \text{ mA/V}^2$



$$U_{GS} = U_T + \sqrt{I_D/k} = 3 + 2 \cdot 2.235$$

$$U_{GS1} = 7.47 \text{ V}$$

$$U_{GS2} = \cancel{1.47 \text{ V}} \dots \text{ta rezultat mi možen!}$$

$$\rightarrow U_{GS} = 7.47 \text{ V} \quad \rightsquigarrow \quad U_{GS} > U_T \rightarrow \text{smo v področju nasičenja!}$$

$$\textcircled{5} \quad -U_{DD} + I_D R_D + U_{DS} = 0$$

$$\rightsquigarrow R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{I_D}$$

\rightsquigarrow v področju nasičenja velja:

$$U_{DS} = ?$$

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_T = 4.47 \text{ V}$$

$$\rightsquigarrow R_{Dmax} = \frac{U_{DD} - U_{Dmin}}{I_D} = 7.76 \text{ k}\Omega$$

$$\rightarrow U_{DS} \geq 4.47$$

$$\rightarrow \text{na meji} \\ U_{Dmin} = 4.47$$

\hookrightarrow največja upornost bo

z pomočjo tega podatka lahko izračunamo R_{Dmax}

na meji med omstim

$U_{DS} = 4.47 \dots$ to velja na meji!

področjem in področjem

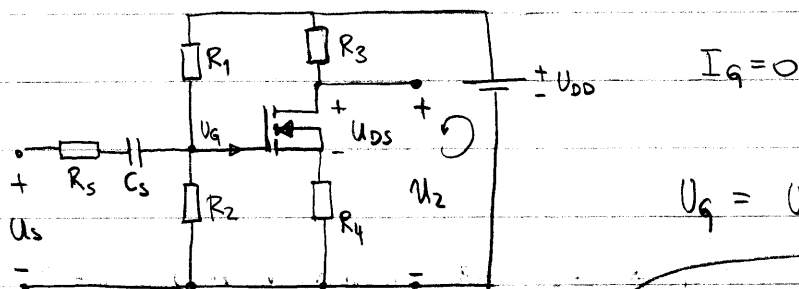
nasičenja ... bolj to bomo v področju nasičenja, manjša bo upornost.

24. $DT = ? (I_D, U_{DS})$. Ali je tranzistor v nasičenju? $U_T = 1 \text{ V}$,

$$\mu_n \cdot C_{ox} = 20 \mu\text{A/V}^2, \quad W = 10 \mu\text{m}, \quad L = 1 \mu\text{m}, \quad R_1 = 30 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 20 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 2 \text{ k}\Omega, \quad U_{DD} = 10 \text{ V}, \quad R_5 = 4 \text{ k}\Omega.$$

$$k = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} = 0.1 \text{ mA/V}^2$$



$$U_G = U_{GS} + I_D \cdot R_4$$

$$U_G = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$$

* Vstavimo v enačbo za U_G in dobimo kvadratno enačbo, iz katere

$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 \quad \text{izračunamo } U_{GS}$$

$$\Rightarrow U_G = U_{GS} + k (U_{GS} - U_T)^2 \cdot R_4$$

$$k \cdot R_4 = 0,1 \text{ mA/V}^2 \cdot 2 \text{ k}\Omega = 0,2 \text{ V}^{-1}$$

$$U_G = U_{GS} + k \cdot R_4 (U_{GS}^2 - 2U_{GS} \cdot U_T + U_T^2)$$

$$4 - U_{GS} - 0,2 U_{GS}^2 + 0,4 U_{GS} - 0,2 = 0$$

$$0,2 U_{GS}^2 + 0,6 U_{GS} - 3,8 = 0 \quad / : 0,2$$

$$U_{GS}^2 + 3 U_{GS} - 19 = 0$$

$$U_{GS} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} =$$

$$= \frac{-3 \pm \sqrt{85}}{2} = \frac{-3 \pm 9,2}{2}$$

$$\Rightarrow U_{GS} = \frac{-3 + 9,2}{2} = \underline{\underline{3,1V}}$$

$$\Rightarrow I_D = 0,1 \text{ mA/V}^2 (3,1V - 1V)^2 =$$

$$= 0,1 \text{ mA/V}^2 \cdot 4,4 \text{ V}^2 = \underline{\underline{0,44 \text{ mA}}}$$

○

$$-U_{DD} + I_D \cdot R_3 + U_{DS} + I_D \cdot R_4 = 0$$

$$\Rightarrow U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_3 + R_4) = 10V - 0,44 \text{ mA} \cdot 12 \text{ k}\Omega = \underline{\underline{4,7V}}$$

$$U_{GS} - U_T = 3,1V - 1V = 2,1V$$

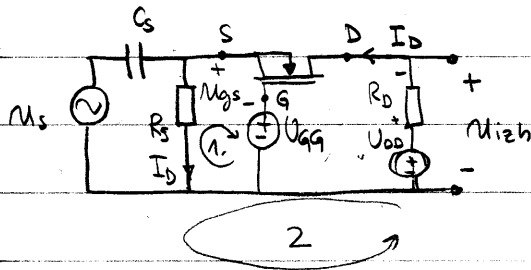
$$4,7 > 2,1$$

$U_{DS} > U_{GS} - U_T \Rightarrow$ smo v področju nasičenja!

25. Določite R_S in R_D tako, da bo delovna točka vezja $I_D = 5 \text{ mA}$,
 $U_{GS} = 10 \text{ V}$. Transistor deluje v področju nasičenja. $V_{DD} = 20 \text{ V}$, $U_{GS} = 10 \text{ V}$,
 $U_T = -2 \text{ V}$, $k = 0.5 \text{ mA/V}^2$

danega

$U_T = -2 \text{ V}$... imamo mos-T z vgrajenim kanalom, ker je pragaovna napetost U_T negativna!



$$I_G = 0$$

$$U_{GS} = U_T \pm \sqrt{I_D/k} = -2 \pm \sqrt{10} = -2 \pm 3.16$$

$$U_{GS1} = -2 + 3.16 = 1.16 \text{ V}$$

$$U_{GS2} = -5.16 \text{ V} \quad \left(U_{GS} \text{ mora biti večji od } U_T \right)$$

U_T , da transistor sploh deluje...

$$\Rightarrow U_{GS} = 1.16 \text{ V}$$

$$1.) -R_S \cdot I_D - U_{GS} + U_{GG} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_D = \frac{U_{GS} - U_{GS}}{I_D} = \frac{10 \text{ V} - 1.16 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = \underline{\underline{1.77 \text{ k}\Omega}}$$

$$2.) -V_{DD} + I_D R_D + U_{DS} + I_D R_S = 0$$

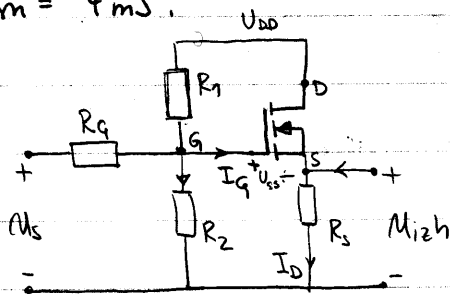
$$I_D R_S = V_{DD} - I_D R_D - U_{DS} \quad \Rightarrow \quad R_S = \frac{V_{DD} - I_D R_D - U_{DS}}{I_D} =$$

$$= \frac{20 \text{ V} - 8.84 \text{ V} - 10 \text{ V}}{5 \text{ mA}} =$$

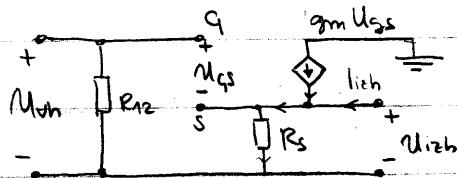
$$= \frac{1.16 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = \underline{\underline{232 \Omega}}$$

Malosignalna analiza vezij z MOS-transistorjem

- 26.) Za vezje z MOS transistorjem z induciranim n kanalom določite Z_{vh} , Z_{izh} in A_{uv} . $R_1 = 750 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$, $R_S = 2,5 \text{ k}\Omega$, $R_G = 100 \text{ k}\Omega$, $g_m = 4 \text{ mS}$.



• nadomestno vezje za malosignalno analizo



$$Z_{vh} = R_{12} = R_1 \parallel R_2 = \frac{150 \cdot 750}{900} = \underline{\underline{125 \text{ k}\Omega}} \checkmark$$

$$Z_{izh} = \frac{U_{izh}}{i_{izh}} ; \quad U_{izh} = g_m U_{gs} R_S$$

? (i_{izh} je 0, kadar je $U_{izh} = -U_{gs}$ in ker izhodnega toka ni velja $U_{izh} = U_{gs}$)

$$i_{izh} = \frac{U_{izh}}{R_S} - g_m U_{gs} = \frac{U_{izh}}{R_S} + g_m U_{izh}$$

$$\Rightarrow Z_{izh} = \frac{1}{\frac{1}{R_S} + g_m} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} = \underline{\underline{227 \Omega}}$$

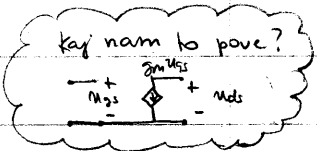
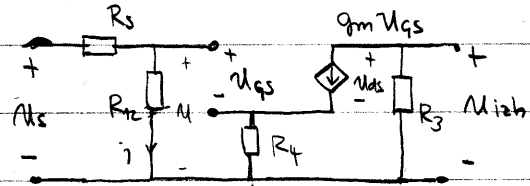
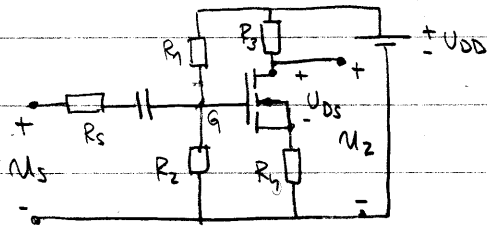
$$A_{uv} = \frac{U_{vzh}}{U_{vsh}} ; \quad U_{vzh} = g_m U_{gs} R_S$$

$$U_{vsh} = U_{gs} + U_{izh}$$

$$\Rightarrow A_{uv} = \frac{g_m U_{gs} R_S}{U_{gs} + g_m U_{gs} R_S} =$$

$$= \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} = \frac{R_S}{\frac{1}{g_m} + R_S} = \underline{\underline{0,909}}$$

27. Za vezje iz naloge 24 narišite nadomestno vezje za majhne signale in izračunajte nap. ojačanje:



$$A_{ms} = \frac{u_{zh}}{u_s}$$

$$u_{zh} = -g_m u_{gs} \cdot R_3$$

$$g_m = 2k(U_{gs} - U_T) = 0.42 \text{ mA/V}$$

$$u = u_{gs} + u_{gs} \cdot g_m \cdot R_4$$

$$i = \frac{u}{R_{12}}$$

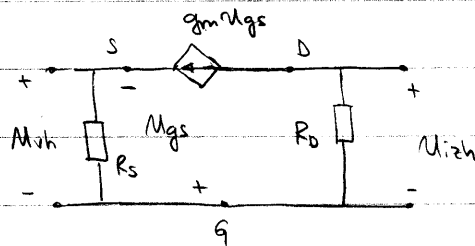
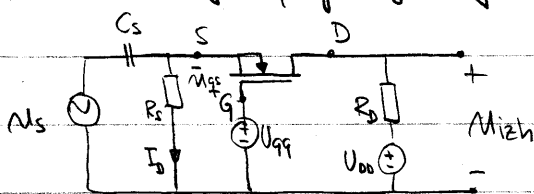
$$u_s = i(R_s + R_{12}) = \frac{u}{R_{12}}(R_s + R_{12})$$

$$\Rightarrow A_{ms} = \frac{-g_m R_3 \cdot R_{12}}{(1 + g_m \cdot R_4)(R_s + R_{12})} =$$

$$u_s = \frac{u_{gs}(1 + g_m R_4) \cdot (R_s + R_{12})}{R_{12}}$$

$$= -1.72$$

28. Za vezje iz naloge 25 narišite nadomestno vezje za majhne signale ter izračunajte nap. ojačanje \$A_{uh}\$.



$$A_{uh} = \frac{u_{zh}}{u_{uh}} = g_m \cdot R_D = 0.733$$

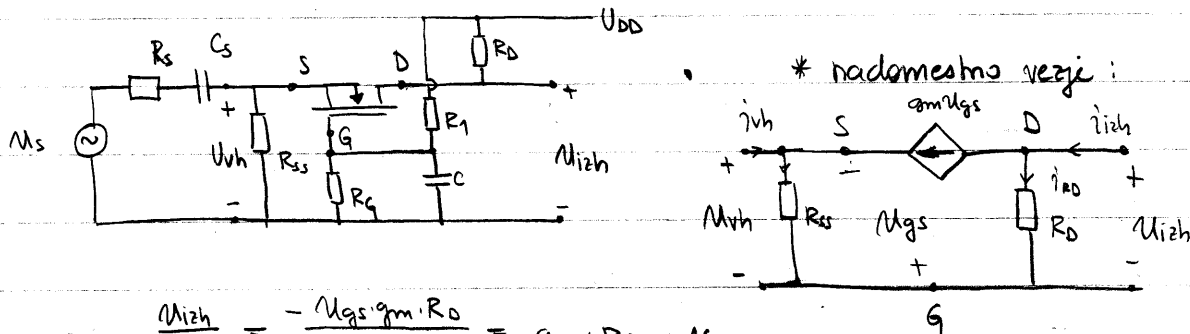
$$u_{zh} = -g_m u_{gs} R_D$$

$$u_{uh} = -u_{gs}$$

$$g_m = 2k(U_{gs} - U_T) = 3.16 \text{ mA/V}$$

29. Za vezje MOS-T z induciranim μ -kanalom parišite nadomestno vezje za majhne signale ter določite Z_{vh} , Z_{izh} in A_{vh} :

$R_1 = 750 \text{ k}\Omega$, $R_D = 4 \text{ k}\Omega$, $R_{ss} = 2.5 \text{ k}\Omega$, $R_g = 150 \text{ k}\Omega$, $R_s = 100 \Omega$, $g_m = 4 \text{ mS}$



$$A_{vh} = \frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{-U_{gs} g_m R_D}{-U_{gs}} = g_m R_D = 16$$

$$g_m = 2k(U_{gs} - U_T) = 4 \text{ mS}$$

$$Z_{vh} = \frac{U_{vh}}{i_{vh}} = \frac{-U_{gs}}{-U_{gs} \left(\frac{1}{R_{ss}} + g_m \right)} = \frac{R_{ss}}{1 + g_m R_{ss}} = \underline{\underline{0.227 \Omega}}$$

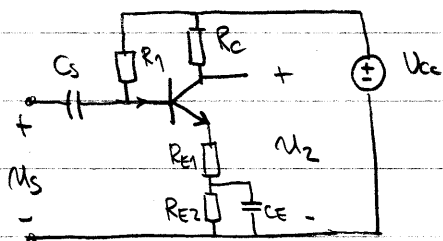
$$\begin{aligned} i_{vh} &= i_{ss} - g_m U_{gs} = \\ &= -U_{gs} / R_{ss} - g_m U_{gs} = \\ &= -U_{gs} \left(\frac{1}{R_{ss}} + g_m \right) \end{aligned}$$

$$Z_{izh} = R_D = \underline{\underline{4 \text{ k}\Omega}}$$

$$\begin{aligned} U_{izh} &= -g_m U_{gs} R_D \\ ? U_{izh} &= g_m U_{gs} R_{ss} \end{aligned}$$

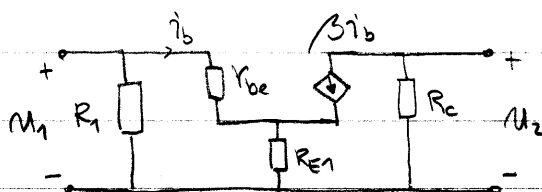
IZPIT

- ① Za podano vezje izračunajte vhodno impedanco ter napetostno ojačanje A_{u1} pri srednjih frekvencah. Narišite nadomestno vezje za majhne signale.
 $U_{cc} = 9V$, $R_1 = 560 k\Omega$, $R_c = 1,5 k\Omega$, $R_{E1} = 47 \Omega$, $R_{E2} = 820 \Omega$, $\beta = 100$.



\rightarrow sklopni emitor

\rightarrow nadomestno vezje:



$$r_{be} = \beta / g_m = 2 k\Omega$$

$$g_m = I_c / U_T = 50 mS$$

$$-U_{cc} + I_B R_1 + U_{BE} + I_E R_1 = 0$$

$$I_c = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{R_1 / \beta + R_{E1}} = 1,3 mA$$

$$R_{vh} = R_1 \parallel (r_{be} + R_{E1} (\beta + 1))$$

$$u_1 = i_b r_{be} + i_b (\beta + 1) R_{E1}$$

$$u_2 = -\beta i_b R_c$$

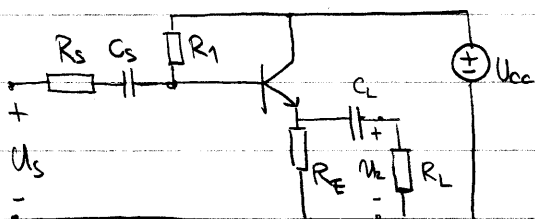
$$A_{u1} = \frac{u_2}{u_1} = - \frac{\beta R_c}{r_{be} + (\beta + 1) R_{E1}}$$

$$= - \frac{R_c}{\frac{1}{g_m} + R_{E1}} = \frac{-1,5 k\Omega}{\frac{1}{50 \cdot 10^3} + 47 \Omega} = -22,4 \checkmark$$

$$R_{vh} = 560 k\Omega \parallel (2 k\Omega + 4,7 k\Omega) = 560 \parallel 6,7 \approx \underline{\underline{6,6 k\Omega}} \checkmark$$

- ② Določite vrednosti upora R_E , da bo $I_c = 3,5 mA$. Izračunajte tudi malosignalno ojačanje vezja A_{u1} ter vhodno in izhodno impedanco

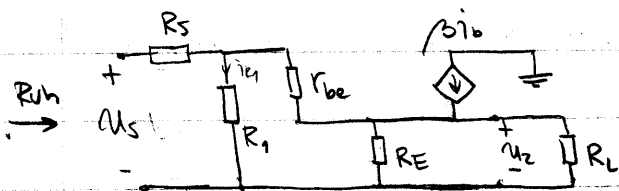
$$U_{cc} = 12V, R_s = 2 k\Omega, R_1 = 330 k\Omega, R_L = 50 \Omega, \beta = 150$$



$$I_B = I_c / \beta ; -U_{cc} + R_1 I_B + U_{BE} + I_E R_E = 0$$

$$I_E \approx I_c ; \rightarrow R_E = (U_{cc} - U_{BE} - R_1 I_c / \beta) / I_c = (12 - 0,7V - 330 k\Omega \cdot \frac{3,5 \cdot 10^{-3} A}{150}) / 3,5$$

$$= 1029 \Omega \checkmark$$



$$R_{vh} = (R_1 \parallel [r_{be} + (R_E \parallel R_L)(\beta + 1)]) + R_s$$

$$R_{izh} = (r_{be} + (R_1 \parallel R_s)) / (\beta + 1) \parallel R_E$$

$$r_{be} = \beta / g_m = \frac{150}{0.136} = 1100 \Omega$$

$$g_m = I_c / U_T = \frac{3.5 \text{ mA}}{25.66 \text{ mV}} = 0.136 = 136 \text{ mS}$$

$$u_2 = R_E (\beta + 1) i_b$$

$$u_s = R_s (i_b + i_{e1}) + R_1 i_{e1}$$

$$i_{e1} = \frac{1}{R_1} (i_b r_{be} + (\beta + 1) i_b R_E) = \frac{1}{R_1} (i_b (r_{be} + (\beta + 1) R_E))$$

$$\text{mno} \Rightarrow u_s = R_s i_b + \frac{R_s}{R_1} i_b (r_{be} + (\beta + 1) R_E) + i_b (r_{be} + (\beta + 1) R_E)$$

$$u_s \approx i_b (R_s + (r_{be} + \beta R_E) (\frac{R_s}{R_1} + 1)) = i_b (R_s + \beta (\frac{1}{g_m} + R_E) \frac{R_s + R_1}{R_1})$$

$$A_{MS} = \frac{u_2}{u_s} = \frac{R_E (\beta + 1)}{R_s + (r_{be} + (\beta + 1) R_E) (\frac{R_s}{R_1} + 1)} =$$

$$\approx \frac{R_E \beta}{R_s + (\beta / g_m + \beta R_E) (\frac{R_s}{R_1} + 1)} =$$

$$= \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 150}{2 \text{ k}\Omega + (1.1 \text{ k}\Omega + 150 \cdot 1.1 \text{ k}\Omega) (\frac{2}{330} + 1)} =$$

$$= \frac{150 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega + 151.1 \text{ k}\Omega} \approx 0.98$$

$$A_{MS} = \frac{48 \Omega \cdot 150}{2 \text{ k}\Omega + (1.1 \text{ k}\Omega + 150 \cdot 48 \Omega)} = \frac{7.2 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega + 8300 \Omega} \approx 0.7 \checkmark$$

$$R_{vh} = (330 \text{ k}\Omega \parallel (1 \text{ k}\Omega + 48 \Omega \cdot 151)) + 2 \text{ k}\Omega = (330 \text{ k}\Omega \parallel 8.2 \text{ k}\Omega) + 2 \text{ k}\Omega = 10 \text{ k}\Omega \checkmark = 8 \text{ k}\Omega$$

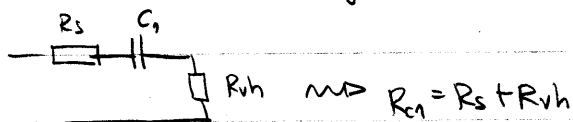
$$R_{izh} = (1.1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega) / 151 \parallel 1 \text{ k}\Omega \approx 20 \Omega \checkmark$$

3) Za vezje pruge nalozite delovne vrednosti kondenzatorjev in rezistorja, da bo spodnja frekvenca meje približno 100 Hz!

frekvenco za kondenzator C_s postavimo za dekado nižje: $10 \text{ Hz} = f_{c1}$

$$C_s = C_1$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad ; \quad R_{c1} = ?$$

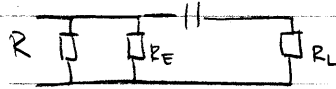


$$R_{c1} = (R_1 \parallel [V_{be} + R_E(\beta+1)]) + R_s = (330 \text{ k}\Omega \parallel [1,1 \text{ k}\Omega + 155,4 \text{ k}\Omega]) + R_s =$$

$$= 106 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega = 108 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow C_1 = \frac{1}{2\pi f_{c1} \cdot R_{c1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 108 \cdot 10^3} = 147 \text{ nF} \quad \checkmark$$

$$f_{c2} = 100 \text{ Hz}$$



$$R_{c2} = (R \parallel R_E) + R_L =$$

$$= ([R_s \parallel R_1] \parallel R_E) + R_L =$$

$$= 20,7 \Omega \parallel 1029 \Omega + 50 \Omega = 40 \Omega$$

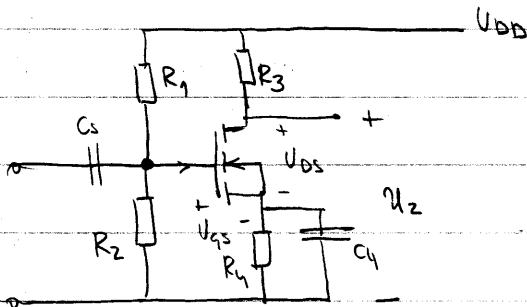
$$R = \frac{(R_s \parallel R_1) + V_{be}}{\beta + 1} =$$

$$= 20,7 \Omega$$

$$\Rightarrow C_2 = \frac{1}{100 \cdot 2\pi \cdot 40} = 22,7 \mu\text{F} \quad \checkmark$$

$$C_2 = 22,7 \mu\text{F}$$

4. Izračunajte delovno točko (I_D, U_{DS}) vezja: $U_{DD} = 18 \text{ V}$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$,
 $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 10 \mu\text{F}$, $C_5 = 50 \mu\text{F}$,
 $\mu_n C_{ox} = 0,2 \text{ mA/V}^2$, $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $U_T = 2 \text{ V}$



$$-U_{DD} + I_D R_3 + U_{DS} + I_D R_4$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_3 + R_4) = (18 - 13) \text{ V} = \underline{\underline{5 \text{ V}}}$$

$$U_G = U_{GS} + I_D \cdot R_4$$

$$I_D = k(U_{GS} - U_T)^2$$

$$U_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{DD} = \left(\frac{100}{100 + 200}\right) \cdot 18 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

$$k = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} = \frac{0,2 \text{ mA/V}^2 \cdot 10 \mu\text{m}}{2 \cdot 1 \mu\text{m}} = 1 \text{ mA/V}^2$$

$$\Rightarrow 12 = U_{GS} + 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 (U_{GS} - U_T)^2 = U_{GS} + 3(U_{GS}^2 - 2U_{GS}U_T + U_T^2) = 6$$

$$\Rightarrow U_{GS} + 3U_{GS}^2 - 12U_{GS} + 12 - 6 = 0$$

$$\Rightarrow 3U_{GS}^2 - 11U_{GS} + 6 = 0$$

$$\Rightarrow I_D = 1 \text{ mA/V}^2 (4 - 3)^2 = \underline{\underline{1 \text{ mA}}} \quad \checkmark$$

$$11 \pm \sqrt{121 - 4 \cdot 3 \cdot 6} = 11 \pm 7$$

$$U_{GS1} = \frac{6}{6} = \underline{\underline{3 \text{ V}}}; \quad U_{GS2} = \frac{6}{3} = \underline{\underline{2 \text{ V}}} < U_T$$