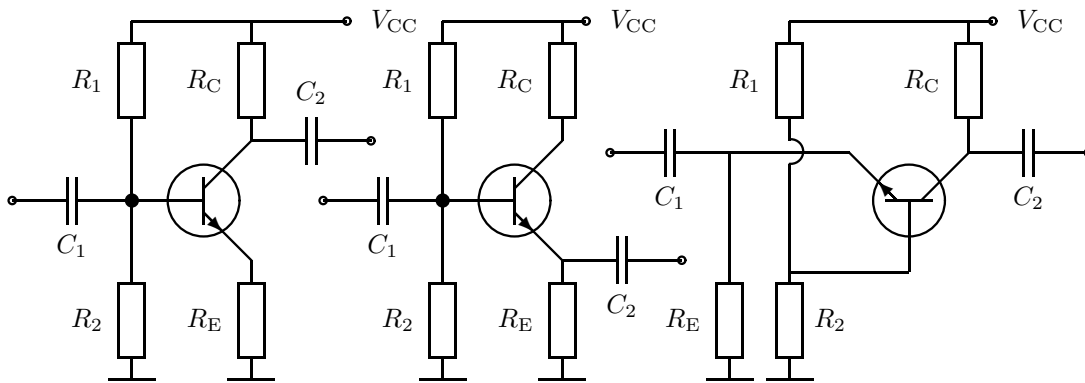


Transistorivahvistimen systemaattinen analyysi

Versio 17.3.2005

Monissa käytännön vahvistinsovelluksissa operaatiovahvistin on täysin syrjäyttänyt irtotransistorit. Elektroniikan laskentamenetelmien opiskelussa transistoripiirit ovat kuitenkin havainnollisia ja sopivan haastavia. Analogisten ja digitaalisten mikropiirien suunnittelussa tarvitaan transistorien tai fettiin analyysimenetelmien tuntemusta. Lisäksi suurilla tehoilla, suurilla taajuuksilla tai matalilla käyttöjännitteillä irtotransistorit ovat vieläkin tarpeen. Kirjan kuvassa 380 on esitetty CE-, CC- ja CB-kytkentäiset vahvistinasteet sellaisessa muodossa, että kaikkien toimintapiste määräytyy samalla tavalla. Ajatusta voidaan edelleen laajentaa: myös signaalinkäsittelyominaisuudet on mahdollista käsitellä yhtenäisellä systemaattisella tavalla esimerkiksi piirin y -matriisin avulla.



DC-analyysi

$$R_{12} = R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{R_{12}}{R_1} V_{CC} \quad (2)$$

$$I_C = \beta \cdot \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_{12} + R_E(\beta + 1)} \quad (3)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E \quad (4)$$

Olkoon käyttöjännite: $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ja transistoriparametrit: $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $\beta = 100$.

Valitaan toimintapiste: $U_{CE} = 5,00 \text{ V}$, $I_B = 0,1 \text{ mA}$, $I_C = 10 \text{ mA}$, $R_C \approx 4R_E$.

Tämä toteutuu, kun: $R_E = 0,1 \text{ k}\Omega$, $R_C = 0,399 \text{ k}\Omega$.

Valitaan V_{BB} :lle joku arvo: $V_{BB} = 5,70 \text{ V}$.

Tämä toteutuu, kun: $R_1 = 70 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 92,79 \text{ k}\Omega$. Tällöin: $R_{12} = 39,9 \text{ k}\Omega$.

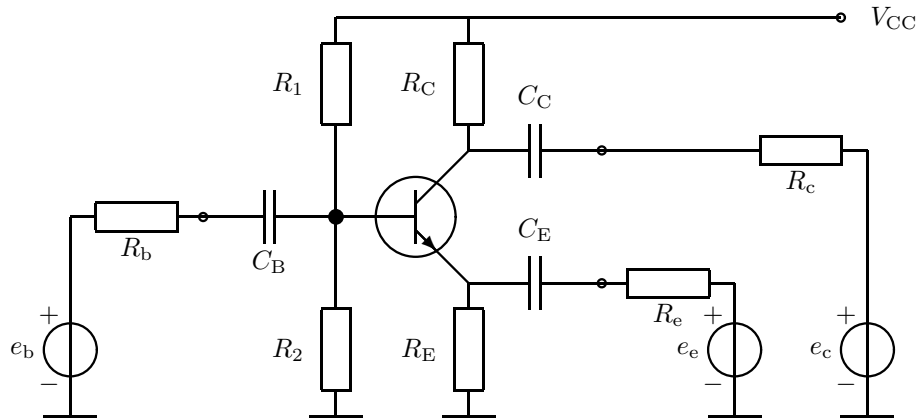
Piensignaaliparametrit (tyypilliset): $U_A = 100 \text{ V}$, $nU_T = 25 \text{ mV}$, $\beta_0 = 100$.

$$r_\pi = \frac{nU_T}{I_B} = 250 \Omega \quad r_o = \frac{U_A}{I_C} = 10 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

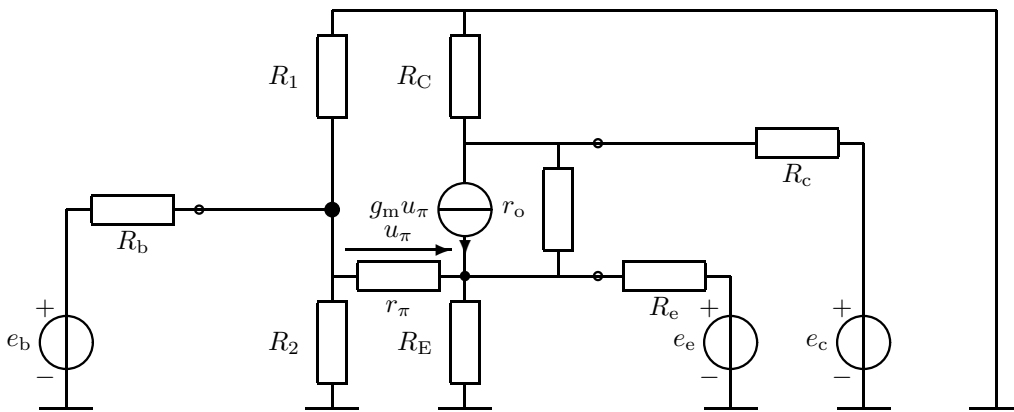
Jos kannan sarjavastus (pn -liitoksen ulkopuolella) eli r_b on annettu, se voidaan sisällyttää (summata) vastukseen r_π , mikäli r_μ ja C_μ jätetään huomiotta (kuten yleensä). Tässä kuitenkin $r_b = 0$.

Piensignaalianalyysi pienillä taajuuksilla

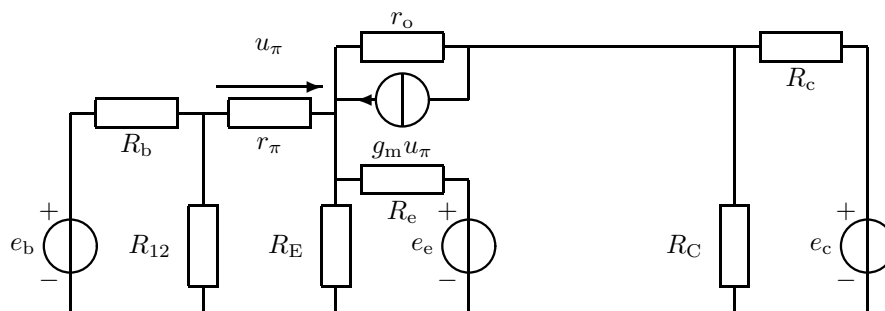
Yleispätevää analyysiä varten kytketään jokaiseen tuloon ja lähtöön signaalilähde ja lähteen sisäinen vastus, joka toimii myös kuormavastuksena:



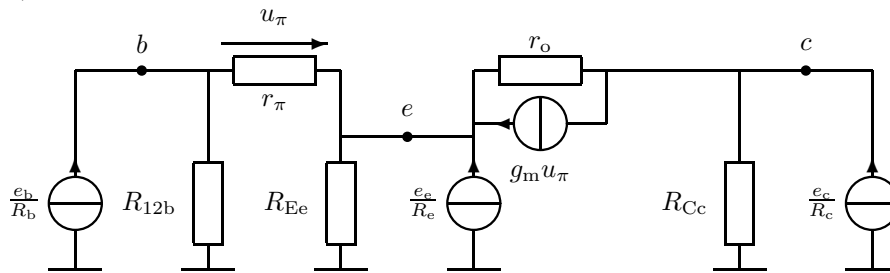
Oletetaan kytkentäkonkat äärettömiksi. Tarkemmassa analyysissä ne voitaisiin sisällyttää porttien pääimpedansseihin (R_b , R_e , R_c). Oikosuljetaan V_{CC} ja korvataan transistori piirimallillaan. Tulokset ovat suoraan sovellettavissa FETeille laskemalla raja-arvo $r_\pi \rightarrow \infty$ ($u_\pi = u_{gs}$).



Piirretään kytkentä selkeämmin:



Muutetaan jännitelähteet virtalähteiksi ja yhdistetään rinnankytkennät (piirissä on vain 3 + 1 solmua!).



Vahvistimen y -matriisi

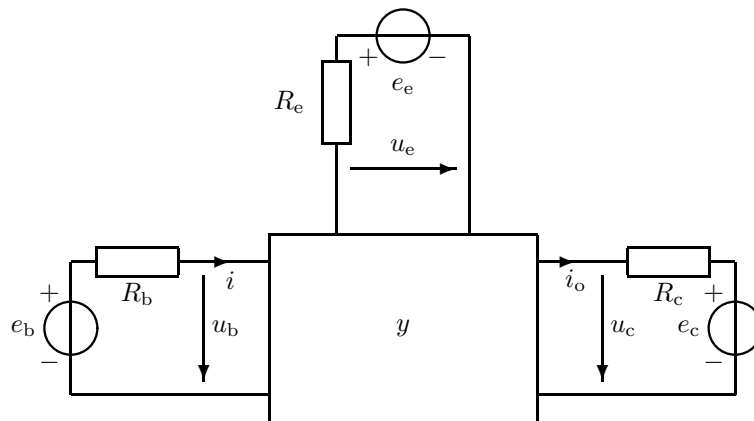
Merkitään $u_\pi = u_b - u_e$ sekä

$$g_\pi = \frac{1}{r_\pi} \quad g_o = \frac{1}{r_o} \quad G_{12b} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_b} \quad G_{Ee} = \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_e} \quad G_{Cc} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_c}$$

$$\begin{bmatrix} G_{12b} + g_\pi & -g_\pi & 0 \\ -g_\pi & G_{Ee} + g_\pi + g_o & -g_o \\ 0 & -g_o & G_{Cc} + g_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_e \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_b}{R_b} \\ \frac{e_e}{R_e} + g_m u_\pi \\ \frac{e_c}{R_c} - g_m u_\pi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} G_{12b} + g_\pi & -g_\pi & 0 \\ -g_\pi - g_m & G_{Ee} + g_\pi + g_o + g_m & -g_o \\ g_m & -g_o - g_m & G_{Cc} + g_o \end{bmatrix}}_y \begin{bmatrix} u_b \\ u_e \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_b}{R_b} = j_b \\ \frac{e_e}{R_e} = j_e \\ \frac{e_c}{R_c} = j_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Tuloksena on kolmeporttinen y -matriisi:



Tulokset:

Portin tulo- ja lähtöresistanssin laskenta, esim. portti b (muiden porttien jännitelähteet nolataan):

$$i = \frac{e_b - u_b}{R_b} = j_b - \frac{u_b}{R_b} \quad (8)$$

$$R_{in} = \frac{u_b}{i} = \frac{u_b}{j_b - \frac{u_b}{R_b}} = \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} \quad (9)$$

Osa komponenteista jää normaalisti pois oheisen taulukon mukaisesti. Taulukossa on kaavat jännitevahvistukselle sekä tulo- ja lähtöresistanssille kaikissa kolmessa konfiguraatiossa. Yksityiskohtaiset tulokset seuraavat jäljempänä.

	e_b	e_c	e_e						
	j_b	j_c	j_e	R_b	R_c	R_e	A_u	R_{in}	R_{out}
CE			0			∞	$\left. \frac{u_c}{e_b} = \frac{u_c}{R_b j_b} \right _{j_e=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} \right _{j_c=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_c}{u_c} - G_c} \right _{j_b=0}$
CC		0			∞		$\left. \frac{u_e}{e_b} = \frac{u_e}{R_b j_b} \right _{j_e=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} \right _{j_e=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_e}{u_e} - G_e} \right _{j_b=0}$
CB	0			∞			$\left. \frac{u_c}{e_e} = \frac{u_c}{R_e j_e} \right _{j_c=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_e}{u_e} - G_e} \right _{j_c=0}$	$\left. \frac{1}{\frac{j_c}{u_c} - G_c} \right _{j_e=0}$

Yllä $A_u = u_o/e_s$ on jännitevahvistus signaalilähteen suhteen. Jännitevahvistus tulojännitteen suhteen (u_o/u_{in}) saadaan raja-arvona $R_b \rightarrow 0$ (CB-kytkennässä $R_e \rightarrow 0$). Pystyviivan oikeassa alareunassa on kaavaan sijoitettava lisäehto: lähtöresistanssia laskettaessa signaalilähde kytketään lähtöporttiin, muutoin tuloporttiin. Virtavahvistus voidaan laskea jännitevahvistuksen ja tuloresistanssin avulla seuraavasti (esim. CE-kytkentä: $e_c = 0, e_e = 0$):

$$i = \frac{e_b}{R_b + R_{in}} \quad (10)$$

$$A_i = \frac{i_o}{i} = \frac{\frac{u_c}{R_c}}{i} = \frac{\frac{A_u e_b}{R_c}}{\frac{e_b}{R_b + R_{in}}} = \frac{R_b + R_{in}}{R_c} A_u \quad (11)$$

Eli yleispätevässä muodossa:

$$A_i = \frac{R_S + R_{in}}{R_L} A_u \quad (12)$$

Tehtäväksi jää laskea jännitteet (u_b, u_e, u_c) signaalilähteen funktiona. Merkitään lyhyemmin:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_e \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_b \\ j_e \\ j_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$u_b = \frac{\begin{vmatrix} j_b & y_{12} & 0 \\ j_e & y_{22} & y_{23} \\ j_c & y_{32} & y_{33} \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{j_b(y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32}) - j_e y_{12}y_{33} + j_c y_{12}y_{23}}{\Delta} \quad (14)$$

$$u_e = \frac{\begin{vmatrix} y_{11} & j_b & 0 \\ y_{21} & j_e & y_{23} \\ y_{31} & j_c & y_{33} \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{j_e y_{11}y_{33} - j_b(y_{21}y_{33} - y_{23}y_{31}) - j_c y_{11}y_{23}}{\Delta} \quad (15)$$

$$u_c = \frac{\begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} & j_b \\ y_{21} & y_{22} & j_e \\ y_{31} & y_{32} & j_c \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{j_c(y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}) + j_b(y_{21}y_{32} - y_{22}y_{31}) - j_e(y_{11}y_{32} - y_{12}y_{31})}{\Delta}$$

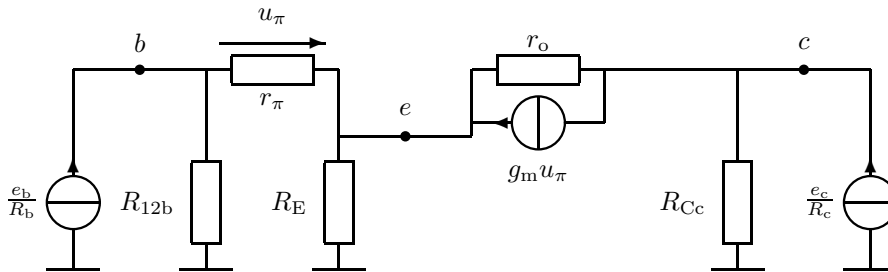
$$\Delta = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{vmatrix} = y_{11}(y_{33}y_{22} - y_{23}y_{32}) + y_{12}(y_{23}y_{31} - y_{33}y_{21}) \quad (17)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{12b} + g_{\pi} & -g_{\pi} & 0 \\ -(g_{\pi} + g_m) & G_{Ee} + g_{\pi} + g_o + g_m & -g_o \\ g_m & -(g_o + g_m) & G_{Cc} + g_o \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_{\pi}} & -\frac{1}{r_{\pi}} & 0 \\ -(\frac{1}{r_{\pi}} + \frac{\beta}{r_{\pi}}) & \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{r_o} + \frac{\beta}{r_{\pi}} & -\frac{1}{r_o} \\ \frac{\beta}{r_{\pi}} & -(\frac{1}{r_o} + \frac{\beta}{r_{\pi}}) & \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{r_o} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Lasketaan esimerkkilukuarvot alla mainituilla lähde- ja kuormaresistansseilla, muut lukuarvot kuten edellä ($R_{12} = 39,9 \text{ k}\Omega$, $R_E = 100 \text{ }\Omega$, $R_C = 399 \text{ }\Omega$, $r_{\pi} = 250 \text{ }\Omega$, $r_o = 10 \text{ k}\Omega$, $g_m = 100/r_{\pi}$).

CE-kytkentä: $R_b = 100 \text{ }\Omega$, $R_e = \infty$, $R_c = 1000 \text{ }\Omega$



$$\frac{u_c}{e_b} = \frac{(y_{21}y_{32} - y_{22}y_{31})}{R_b\Delta} = -2,718 \quad (20)$$

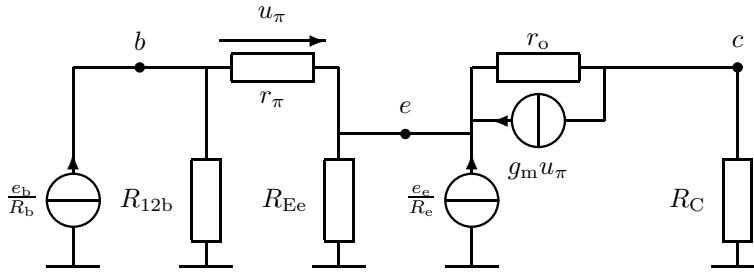
$$\frac{j_b}{u_b} = \frac{\Delta}{y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32}} = y_{11} + \frac{y_{12}(y_{23}y_{31} - y_{33}y_{21})}{y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32}} \quad (21)$$

$$\frac{j_c}{u_c} = \frac{\Delta}{y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}} = y_{33} + \frac{y_{23}(y_{12}y_{31} - y_{11}y_{32})}{y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}} \quad (22)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} = 7,981 \text{ k}\Omega \quad (23)$$

$$R_{out} = \frac{1}{\frac{j_c}{u_c} - G_c} = 398,3 \text{ }\Omega \quad (24)$$

CC-kytkentä: $R_b = 100 \Omega$, $R_e = 1000 \Omega$, $R_c = \infty$



$$\frac{u_e}{e_b} = \frac{-(y_{21}y_{33} - y_{23}y_{31})}{R_b\Delta} = 0,9592 \quad (25)$$

$$\frac{j_b}{u_b} = y_{11} + \frac{y_{12}(y_{23}y_{31} - y_{33}y_{21})}{y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32}} \quad (26)$$

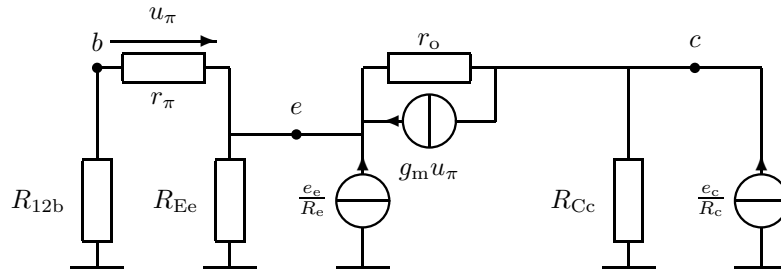
$$\frac{j_e}{u_e} = \frac{\Delta}{y_{11}y_{33}} = y_{22} + \frac{y_{12}(y_{23}y_{31} - y_{33}y_{21}) - y_{11}y_{23}y_{32}}{y_{11}y_{33}} \quad (27)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} = 7,348 \text{ k}\Omega \quad (28)$$

$$R_{out} = \frac{1}{\frac{j_e}{u_e} - G_e} = 3,473 \Omega \quad (29)$$

CB-kytkentä: $R_b = 100 \Omega$, $R_e = 100 \Omega$, $R_c = 1000 \Omega$

Koska R_{12} on niin suuri, annetaan R_b :lle pienempi arvo (jännitevahvistuksen suurentamiseksi).



$$\frac{u_c}{e_e} = \frac{-(y_{11}y_{32} - y_{12}y_{31})}{R_e\Delta} = 2,635 \quad (30)$$

$$\frac{j_e}{u_e} = y_{22} + \frac{y_{12}(y_{23}y_{31} - y_{33}y_{21}) - y_{11}y_{23}y_{32}}{y_{11}y_{33}} \quad (31)$$

$$\frac{j_c}{u_c} = y_{33} + \frac{y_{23}(y_{12}y_{31} - y_{11}y_{32})}{y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}} \quad (32)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\frac{j_e}{u_e} - G_e} = 3,437 \Omega \quad (33)$$

$$R_{out} = \frac{1}{\frac{j_c}{u_c} - G_c} = 397,8 \Omega \quad (34)$$

Tarkistukset APLACilla

```

Aplacvar Rb=100
Aplacvar Rf=1000000
Aplacvar Rl=1000
Aplacvar eb=0
Aplacvar ee=0
Aplacvar ec=1
* Ed. lukuarvot vastaavat Rout:n laskentaa CE-tapauksessa
* Muuta eb=1 ja ec=0, kun lasket Rin tai Au

```

```

Aplacvar rpi=250
Aplacvar ro=10k
Aplacvar gm=100/rpi

```

```

VCCS T 3 2 1 1 2 gm
Res ro 3 2 ro
Curr jb 0 11 DC=eb/Rb
Curr je 0 22 DC=ee/Rf
Curr jc 0 33 DC=ec/Rl
Res Rb 11 0 Rb
Res Rf 22 0 Rf
Res Rl 33 0 Rl
Res R12 1 0 39.9k
Res rpi 1 2 rpi
Res RE 2 0 100
Res RC 3 0 0.399k
Short Sb 11 1 I=Ib
Short Se 22 2 I=Ie
Short Sc 33 3 I=Ic

```

Analyze DC

* Koska piiri on resistiivinen, voidaan piensignaalianalyysi tehdä DC:llä

* Jännitevahvistus, tuloresistanssi, lähtöresistanssi

```

Print s "CE" Real Vdc(3) s " " Real Vdc(1)/Idc(Ib) s " " Real Vdc(3)/Idc(Ic) LF
* Print s "CC" Real Vdc(2) s " " Real Vdc(1)/Idc(Ib) s " " Real Vdc(2)/Idc(Ie) LF
* Print s "CB" Real Vdc(3) s " " Real Vdc(2)/Idc(Ie) s " " Real Vdc(3)/Idc(Ic) LF

```

* Volt Vcc v 0 DC=10 \$Toimintapisteanalyysi

* Res R20 b 0 92.79k

* Res R10 v b 70k

* Res Rc0 v s 0.399k

* Res Re0 e 0 100

* Short c s c I=Ic

* Volt Vbe b e DC=0.7 I=IB

* CCCS TDC c e 1 IB 100

* Analyze DC

* Print Real Idc(Ic) s " " Real Vdc(c)-Vdc(e) LF

Yksinkertaistetut tulokset

Monissa kirjoissa (esim. Millman) jännitevahvistuksen ym. kaavat on esitetty ilman vastuksia R_1 ja R_2 , mikä on otettava huomioon tuloksia verrattaessa.

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_\pi} & -\frac{1}{r_\pi} & 0 \\ -\frac{\beta+1}{r_\pi} & \frac{1}{R_E} + \frac{\beta+1}{r_\pi} & 0 \\ \frac{\beta}{r_\pi} & -\frac{\beta}{r_\pi} & \frac{1}{R_C} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \approx \frac{1}{R_C} \left[\left(\frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_\pi} \right) \left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta+1}{r_\pi} \right) - \frac{1}{r_\pi} \frac{\beta+1}{r_\pi} \right] \quad (35)$$

$$= \frac{1}{R_C} \left[\frac{1}{R_b} \left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta+1}{r_\pi} \right) + \frac{1}{r_\pi} \frac{1}{R_E} \right] \quad (36)$$

Esimerkiksi CE-kytkennässä $R_b = R_S$ ja $R_C = R_C || R_L$. Sievennysten jälkeen saadaan:

$$\frac{u_c}{e_b} = \frac{y_{21}y_{32} - y_{22}y_{31}}{R_b\Delta} = \frac{-\beta R_C}{R_b + r_\pi + R_E(\beta+1)} \quad (37)$$

$$\frac{j_b}{u_b} = \frac{\Delta}{y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32}} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{r_\pi + (\beta+1)R_E} \quad (38)$$

$$\frac{j_c}{u_c} = \frac{\Delta}{y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}} = \frac{1}{R_C} \quad (39)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\frac{j_b}{u_b} - G_b} = r_\pi + (\beta+1)R_E \quad (40)$$

$$R_{out} = \frac{1}{\frac{j_c}{u_c} - G_c} = R_C \quad (41)$$

Trankun sisäinen takaisinkytkentä ja h -parametrit

Edellä ei otettu huomioon takaisinkytkentäparametria $h_{12} = h_{rx}$ (missä $x = e, c, b$). Se voidaan sisällyttää y -matriisiin seuraavasti:

$$y = \begin{bmatrix} G_{12b} + y_{bb} & -(y_{bb} + y_{bc}) & y_{bc} \\ -(y_{bb} + y_{cb}) & G_{Ee} + (y_{bb} + y_{cb}) + (y_{cc} + y_{bc}) & -(y_{cc} + y_{bc}) \\ y_{cb} & -(y_{cc} + y_{cb}) & G_{Cc} + y_{cc} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$y_{bb} = \frac{1}{h_{11}} = \frac{1}{h_{ix}} \quad y_{bc} = -\frac{h_{12}}{h_{11}} = -\frac{h_{rx}}{h_{ix}} \quad (43)$$

$$y_{cb} = \frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{h_{fx}}{h_{ix}} \quad y_{bb} = \frac{\Delta h}{h_{11}} = \frac{h_{ix}h_{ox} - h_{fx}h_{rx}}{h_{ix}} \quad (44)$$

Tällöin $y_{13} = y_{bc}$ ei enää ole nolla. Jos $h_{re} = 0$, $h_{rc} = 0$ ja $h_{rb} = 0$, tulokset ovat samat kuin edellä.