ESERCIZIO 1

1.1 - Punto di riposo

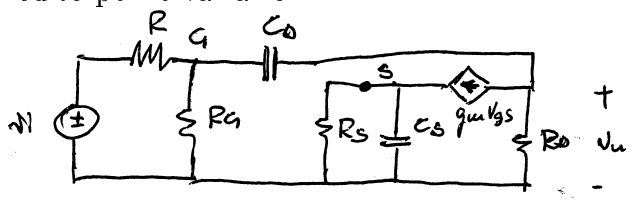
$$\begin{cases} V_{GS} &= V^+ \dfrac{R_2}{R_1+R_2} - R_S I_D \\ I_D &= \dfrac{\beta_n}{2}(V_{GS}-V_T)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_D &= 2.19\,\text{mA} \\ V_{GS} &= 2.75\ \text{V} \end{cases}$$

$V_{DS} = V^+ - (R_D + R)S)I_D = 4.33\ \text{V} > V_{GS} - V_T$ (OK saturazione)

Nel p.r. si ha $g_m = \beta_n(V_{GS} - V_T) = 3.242\,\text{mS}$.

1.2,1.3 - Risposta in frequenza e diagrammi di Bode

Circuito per le variazioni:



$R_G = R_1 \| R_2 = 41.2\,\text{k}\Omega$.

I condensatori C_S e C_D interagiscono; si utilizzerà l'ipotesi di separazione in banda ($f_{pCS} \ll f_{pCD}$).

$R_S^0 = R_S \| 1/g_m = 236\,\Omega$ da cui $f_{pCS} = \dfrac{1}{2\pi C_S R_S^0} = 1.44$ kHz.

Per C_D (con C_S chiuso) si ha:

$v_p = (R\|R_G)i_p + R_D(i_p + g_m v_{gs})$ con $v_{gs} = (R\|R_G)i_p$

Segue $R_D^S = \dfrac{v_p}{i_p} = (R\|R_G) + R_D[1 + g_m(R\|R_G)] = 11.39\,\text{k}\Omega$,

da cui, infine, $f_{pCD} = \dfrac{1}{2\pi C_D R_D^S} = 139.7$ kHz.

L'ipotesi risulta effettivamente verificata.

In bassa frequenza, con i due condensatori aperti, si ha

$$A_0 = \left.\frac{v_u}{v_i}\right|_{C_S, C_D \text{aperti}} = -\frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \cdot \frac{R_G}{R + R_G} = -1.87 \quad (= 5.42\,\text{dB})$$

A medie frequenze (C_S chiuso e C_D aperto), si ha

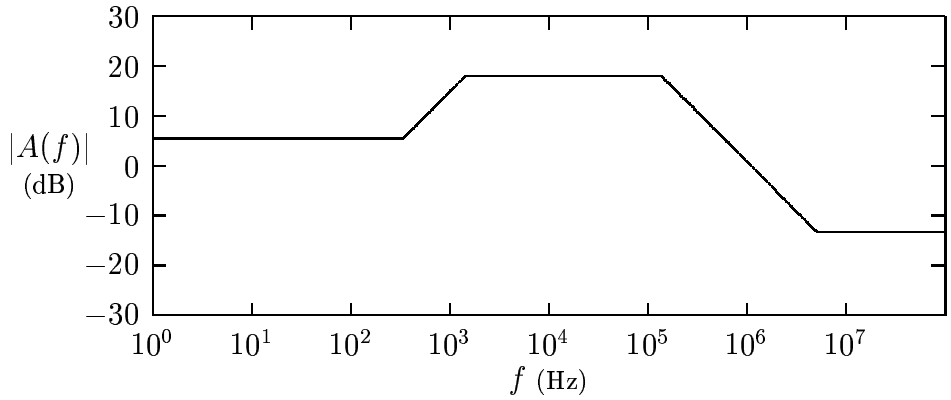
$$A_1 = \left.\frac{v_u}{v_i}\right|_{C_D\,\text{aperto}} = -g_m R_D \frac{R_G}{R+R_G} = -7.91 \quad (\simeq 18\,\text{dB})$$

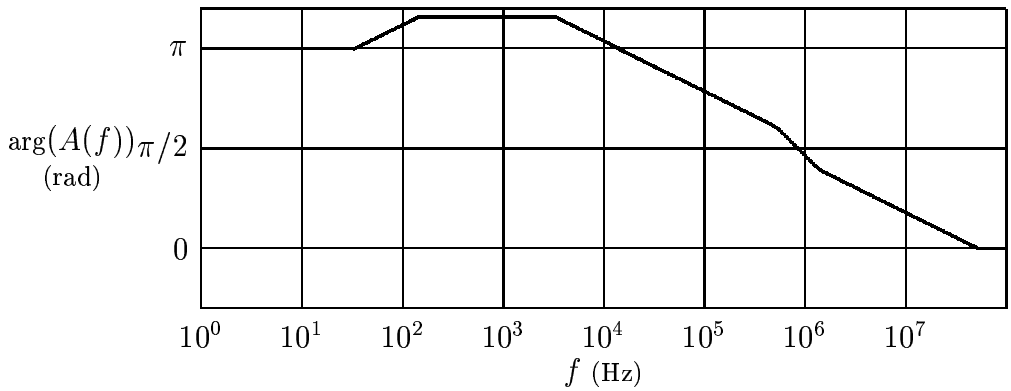
Ad alte frequenze (tutti i condensatori sono chiusi), si ha

$$A_2 = \left.\frac{v_u}{v_i}\right|_{C_S, C_D\,\text{chiusi}} = \frac{R_D \| R_G \| 1/g_m}{(R_D \| R_G \| 1/g_m) + R} = 0.214 \quad (= -13.4\,\text{dB})$$

Il condensatore C_S produce uno zero (negativo) alla frequenza $f_{zCS} = \dfrac{1}{2\pi R_S C_S} = 339$ Hz. Poiché inoltre A_2 è di segno opposto ad A_1, lo zero (dovuto a C_D) è positivo; la sua frequenza può essere determinata come $f_{zCD} = f_{pCD}\dfrac{|A_1|}{A_2} = 5.16$ MHz.

$$A(f) = A_0 \frac{\left(1 + j\dfrac{f}{f_{zCS}}\right)\left(1 - j\dfrac{f}{f_{zCD}}\right)}{\left(1 + j\dfrac{f}{f_{pCS}}\right)\left(1 + j\dfrac{f}{f_{pCD}}\right)}$$

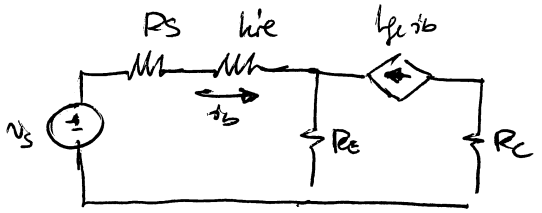


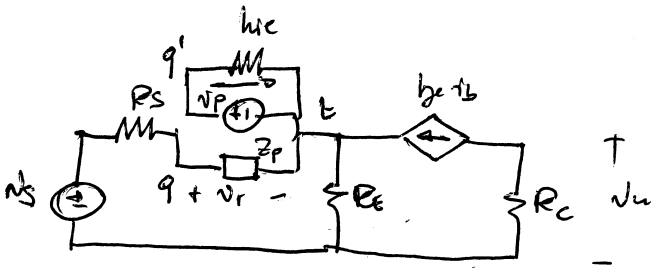


ESERCIZIO 2

2.1 – Guadagno a centro banda

Circuito per le variazioni e scomposizione





$\rho = 0 \qquad Z_p = Z = h_{ie} = 3\,k\Omega$

$$\alpha = \left.\frac{v_r}{v_s}\right|_{v_p=0} = \frac{Z_p}{R_S + Z_p + R_E} = 0{,}625$$

$$\beta = \left.\frac{v_r}{v_u}\right|_{v_s=0} = -h_{fe}\frac{R_E}{R_E + Z_p + R_S} Z_p \left(-h_{fe} R_C\right)^{-1} =$$

$$= \frac{R_E Z_p}{R_C\left(R_E + Z_p + R_S\right)} = 0{,}284$$

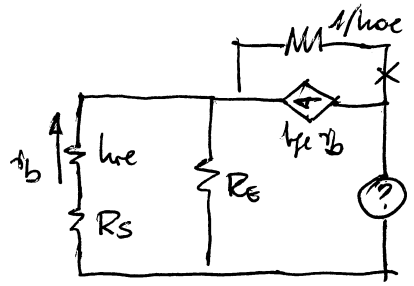
$$A = \left.\frac{v_u}{v_p}\right|_{v_s=0} = -h_{fe}\frac{R_C}{h_{ie}} = -231$$

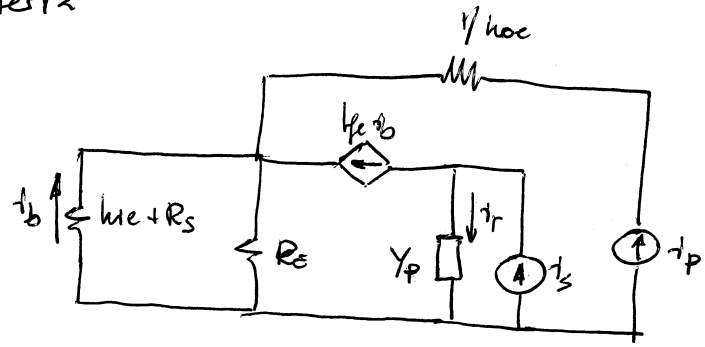
Reazione <u>negativa</u>

$$\gamma = \left.\frac{v_u}{v_s}\right|_{v_p=0} = 0$$

$$A_f = \frac{\alpha A}{1 - \beta A} + \gamma = -2{,}17$$

2.2 Resistenze d'uscita





$$\rho = 0 \qquad Y_p = Y_i = \left\{ \frac{1}{h_{oe}} + \left[R_E \parallel \left(\frac{h_{ie}+R_s}{h_{fe}+1} \right) \right] \right\}^{-1} = 49{,}96\ \mu S$$

$$\beta A = \left. \frac{i_r}{i_p} \right|_{i_s=0} = \frac{h_{fe}}{h_{fe}+1+\frac{h_{ie}+R_s}{R_E}} = 0{,}985 \qquad Y_b = 0$$

$$Y_{in} = (Y_p + Y_b)(1-\beta A) = 750\ nS \qquad R_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = 1.33\ M\Omega$$

Reazione positiva di tensione

2.3 Res. d'ingresso

Stesso taglio dell'esercizio 2.1

$$Z_b = R_s + R_E$$

$$R_{in} = (Z_p + Z_b)(1-\beta A) = (h_{ie}+R_s+R_E)\left(1 + \frac{h_{fe} R_E Z_p}{h_{ie}(R_E+Z_p+R_s)}\right)$$

$$= 319.8\ k\Omega$$

Reazione negativa serie

ESERCIZIO 3

3.1 - Punto di riposo

Transistor 2: $$V^+\frac{R_2}{R_1+R_2} - (R_1\|R_2)I_{B2} - V_\gamma - R_{E2}(I_{C2}+I_{B2}) = 0 \qquad (1)$$

trascurando la caduta $(R_1\|R_2)I_{B2}$ rispetto al primo termine (ipotesi di partitore pesante) e la corrente di base rispetto a quella di collettore segue

$$I_{C2} = \frac{V^+\dfrac{R_2}{R_1+R_2} - V_\gamma}{R_{E2}} = 2.17\,\text{mA}$$

Inoltre $V_{CE2} = V^+ - (R_{E2}+R_{C2})I_{C2} = 8.71$ V e dalle caratteristiche d'uscita $I_{B2} = 8.2\,\mu$A.

Transistor 1: $$V^+ - R_{E1}(I_{C1}+I_{B1}) - V_\gamma - V^+\frac{R_4}{R_3+R_4}I_{B1} = 0$$

cioè $$V^+\frac{R_3}{R_3+R_4} - (R_3\|R_4)I_{B1} - V_\gamma - R_{E1}(I_{C1}+I_{B1}) = 0$$

È la stessa equazione (1). Risolvendo con le stesse ipotesi si ottiene

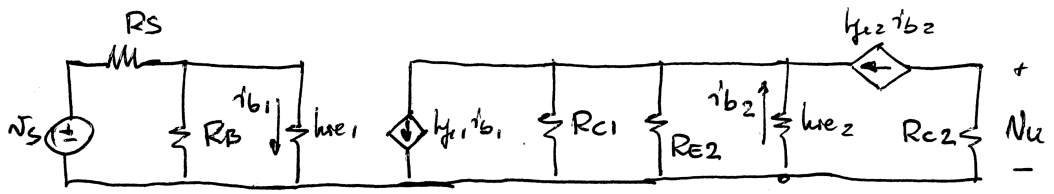
$I_{C1} = 2.17\,\text{mA}$, $V_{CE1} = -8.71$ V e, dalle caratteristiche, $I_{B1} = I_{B2} = 8.2\,\mu$A ($I_{C1}$ e I_{B1} sono assunte positive nel verso in cui effettivamente scorrono).

Essendo $\dfrac{V^+}{R_1} \gg I_{B1}$ $\left(\dfrac{V^+}{R_4} \gg I_{B2}\right)$ l'ipotesi di partitore pesante risulta verificata.

Nel p.r. si ha (per entrambi i transistor) $h_{fe} = 340$, $h_{ie} = r_{bb'} + \dfrac{V_T}{I_C}h_{fe} = 4.93\,\text{k}\Omega$.

3.2 - Guadagno a centro banda

A centro banda tutti i condensatori sono da considerare cortocircuiti. Il circuito equivalente è (amplificatore Cascode, $R_B = R_1\|R_2$):



$$\frac{v_u}{v_s} = -R_{C2}h_{fe2}\frac{1}{h_{ie2}}h_{fe1}\left(R_{C1}\|R_{E2}\|\frac{h_{ie2}}{h_{fe2}+1}\right)\frac{1}{h_{ie1}+(R_S\|R_B)}\cdot\frac{R_B}{R_S+R_B} = -90.8(=39.2\,\text{dB})$$

ESERCIZIO 4

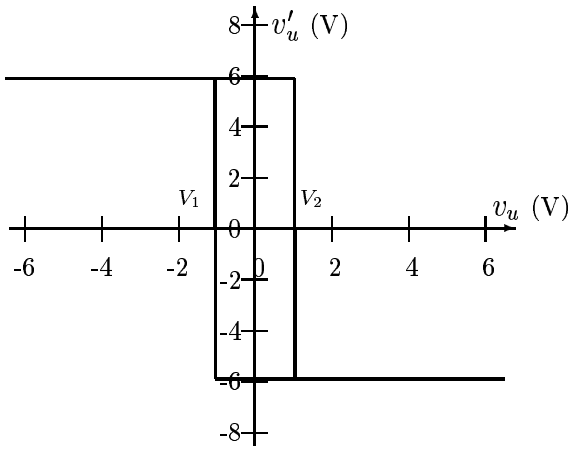
4.1 - Istanti di commutazione

v_u'': tensione a onda quadra con valori di picco $\pm V_Q = \pm(V_Z + V_\gamma) = \pm 5.9$ V.

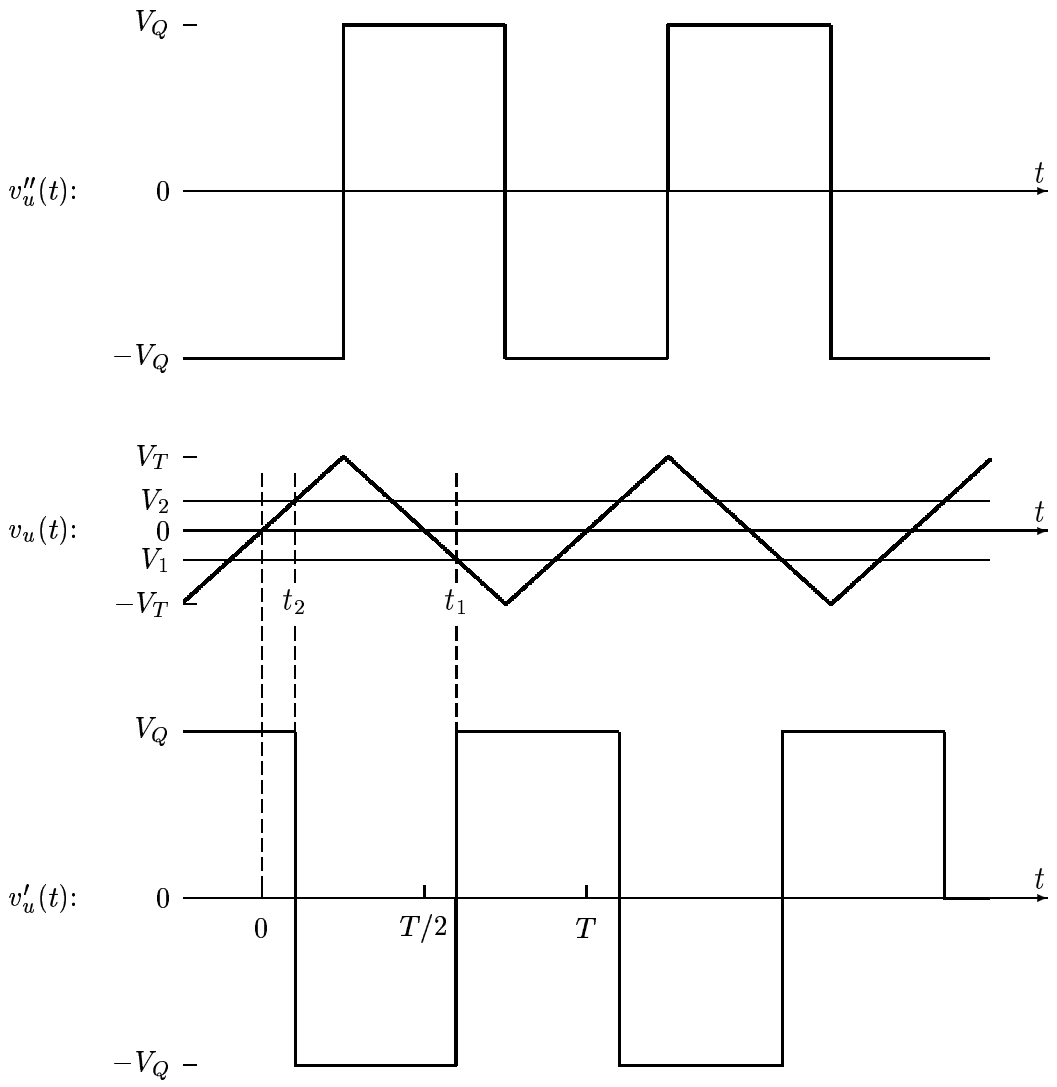
v_u: tensione a onda triangolare con valori di picco $\pm V_T = \pm \dfrac{R_1}{R_2} V_Q = \pm 2.61$ V (simmetrica).

La pendenza dei fronti di v_u è $p = \pm \dfrac{V_Q}{RC} = \pm 9.93$ V/ ms (v. diagramma). Il periodo dei due segnali è $T = 4V_T/p = 4V_T RC/V_Q = 1.05\,\text{ms}$.

Il terzo stadio è un comparatore invertente con valori dell'uscita pari a $\pm V_Q$ e soglie $V_1 = -\beta V_Q = -1.035$ V e $V_2 = \beta V_Q = 1.035$ V (v. caratteristica di trasferimento).

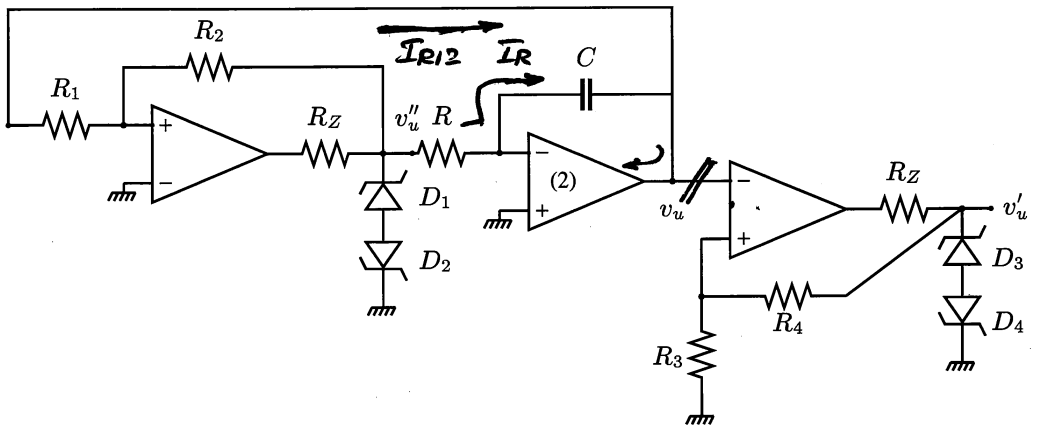
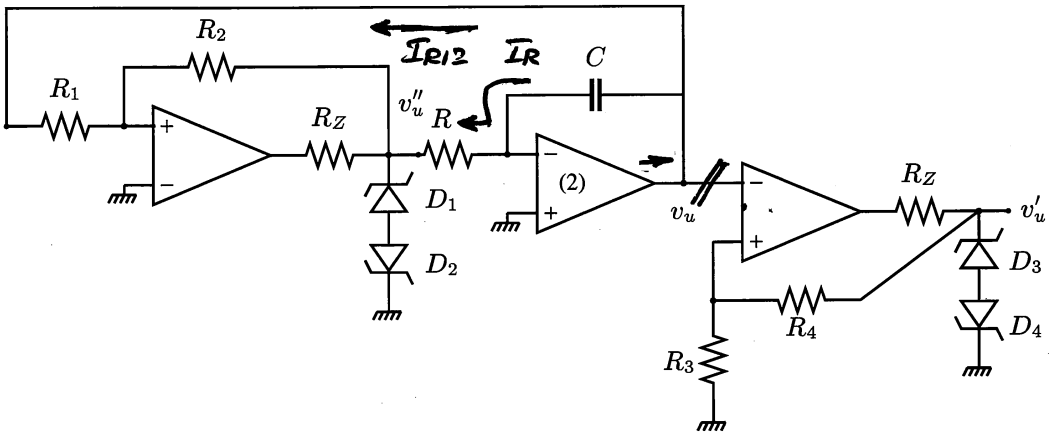


La tensione $v_u(t)$, per $0 < t < T/4$, ha andamento lineare con pendenza p (calcolata in precedenza) e pertanto si ha $v_u(t) = pt \quad (0 < t < T/4)$. In questo intervallo di tempo si verifica la commutazione verso il basso della tensione v_u' nell'istante (t_2) in cui la tensione $v_u(t)$ assume valore pari a V_2. Imponendo $v_u(t_2) = pt_2 = V_2$ segue $t_2 = V_2/p = 104.2\,\mu$s. Per la simmetria delle forme d'onda e della caratteristica del comparatore, la commutazione verso l'alto si verifica con il ritardo di un semiperiodo rispetto all'istante t_2; dunque $t_1 = t_2 + T/2 = 629.7\,\mu$s.



4.2 - Corrente all'uscita dell'A.O.

Con l'uscita (v''_u) allo stato alto, l'A.O. assorbe la somma delle correnti $I_R = V_Q/R$ (che scorre nella resistenza R) e $I_{R12} = \dfrac{V_Q - v_u(t)}{R_1 + R_2}$ che scorre nelle resistenza R_1 ed R_2; mentre la prima è costante, quest'ultima varia nel tempo ed è massima quando la tensione $v_u(t)$ è minima, ossia quando assume valore $-V_T$. Dunque $I_{MAX} = \dfrac{V_Q}{R} + \dfrac{V_Q + V_T}{R_1 + R_2} = 2.3\,\mathrm{mA}$.



Con l'uscita (v''_u) allo stato basso l'A.O. eroga la somma delle correnti V_Q/R (che scorre nella resistenza R, ma con verso opposto rispetto al semiperiodo precedente) e $\dfrac{v_u - (-V_Q)]}{(R_1 + R_2)} = \dfrac{v_u + V_Q}{(R_1 + R_2)}$ attraverso le resistenze R_1 ed R_2; quest'ultimo termine assume valore massimo (rendendo quindi massimo il valore dell'intera corrente) quando si ha $v_u = V_T$; dunque, anche in questa fase, $I_{\mathrm{MAX}} = \dfrac{V_Q}{R} + \dfrac{V_Q + V_T}{R_1 + R_2} = 2.3\,\mathrm{mA}$ (nel verso opposto rispetto al caso precedente).