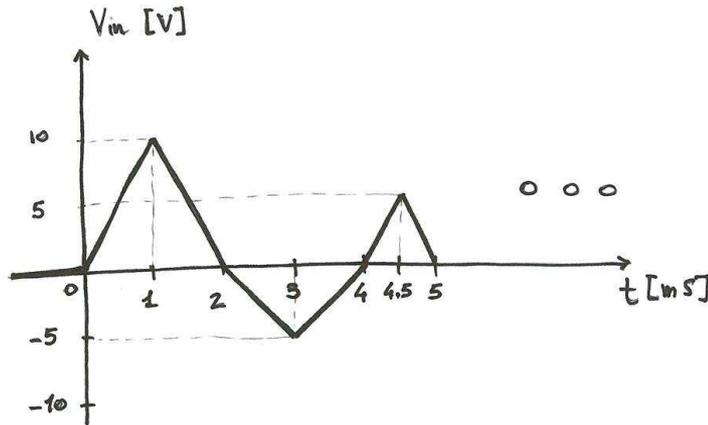
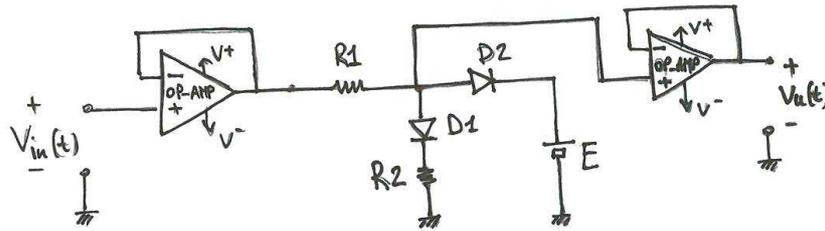


SCHEMA <b>A16_09</b>		Data: <b>21 Novembre 2016</b>
Cognome	Nome	Matricola

### ESERCIZIO N°1

5 punti (4)

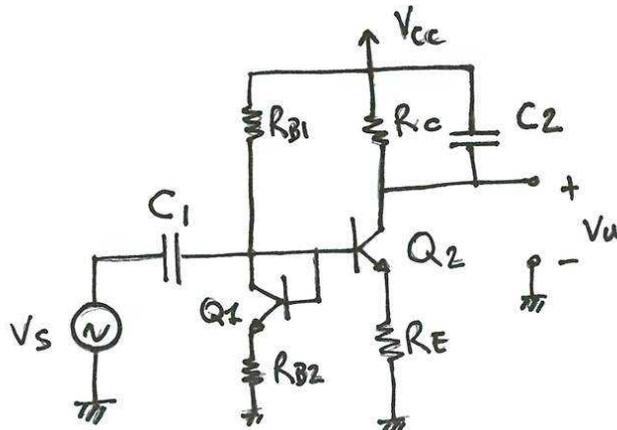
Con riferimento al circuito in figura, determinare l'andamento nel tempo della tensione di uscita  $V_u(t)$  e, per ogni istante di tempo, il regime di funzionamento dei diodi nel caso in cui la tensione di ingresso  $V_{in}(t)$  sia il segnale periodico di periodo  $T = 5$  ms di cui è riportato in figura un periodo. Per i diodi D1 e D2 sia  $V_G = 0$  V,  $R_1 = 18$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 6$  k $\Omega$ ,  $E = 2$  V. Si considerino gli amplificatori operazionali ideali.



### ESERCIZIO N°2

8 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, determinare il punto di riposo dei transistor Q1 e Q2. Per entrambe i transistor si consideri  $h_{FE} = 100$ ,  $R_{B1} = 45$  k $\Omega$ ,  $R_{B2} = 5$  k $\Omega$ ,  $R_E = 0.2$  k $\Omega$ ,  $R_C = 1$  k $\Omega$ ,  $C_1 = 12$  nF,  $C_2 = 3$   $\mu$ F,  $V_{CC} = 20$  V.



### ESERCIZIO N°3

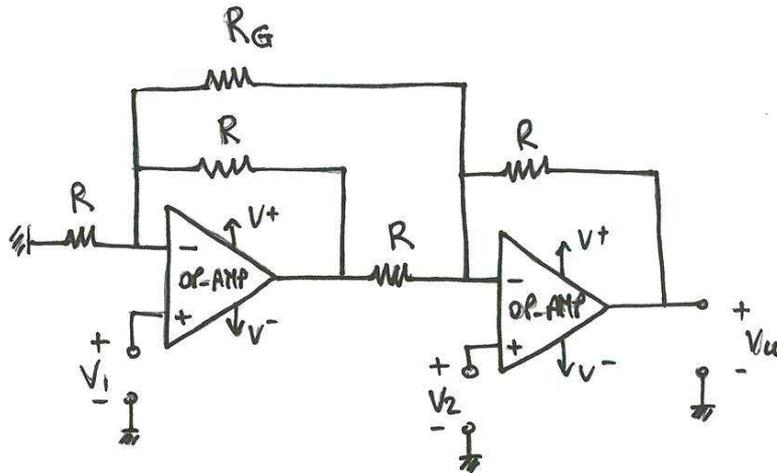
9 punti (4)

Con riferimento al circuito mostrato nell'esercizio precedente si ricavi la funzione di trasferimento  $A_v(s) = V_U/V_S$ . Per entrambe i transistor Q1 e Q2 si considerino  $h_{fe} = 300$ ,  $h_{ie} = 4.8 \text{ k}\Omega$  ed  $h_{oe} = 0 \text{ S}$ .

### ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

Determinare l'amplificazione differenziale del circuito riportato in figura. Siano  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 2.5 \text{ k}\Omega$  e gli amplificatori operazionali ideali.



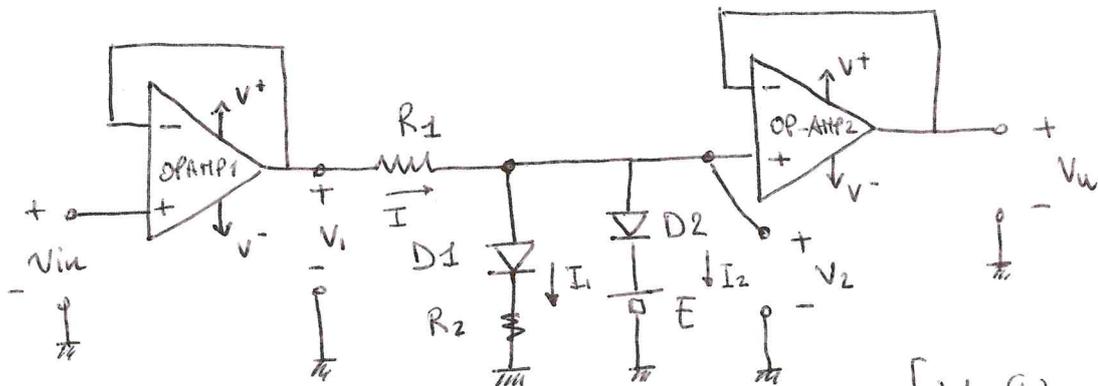
### ESERCIZIO N°5

5 punti (4)

Con riferimento al circuito mostrato nell'esercizio precedente, ricavare il massimo sbilanciamento in uscita.. Si considerino ideali gli l'amplificatore operazionale a meno dei generatori di offset e sbilanciamento  $|V_{io}| = 5 \text{ mV}$ ,  $I_B = 80 \text{ nA}$  ed  $|I_{io}| = 20 \text{ nA}$ .

• Svolgimento - Scheda A16-09

• Es 1



$$\begin{cases} V_1(t) = V_{in}(t) \\ V_u(t) = V_2(t) \end{cases}$$

•  $t \leq 0s$  :

•  $V_{in}(t) = 0 \rightarrow V_1(t) = 0$

• Ipotesi di lavoro : D1 e D2 off

•  $V_2(t) = V_1(t) = 0$  [non sono connesse in  $R_1$ ]

•  $V_u(t) = V_2(t) = 0$

• Verifica ipotesi di lavoro :

$$V_{D1} = V_2 - R \cdot I_1, \quad I_1 = 0$$

$$V_{D1} = V_2 = 0V$$

$$V_{D1} = 0 \ \& \ I_1 = 0 \quad \text{OK D1 OFF}$$

$$V_{D2} = V_2 - E = 0V - 2V = -2V$$

$$V_{D2} = -2V \quad \text{OK D2 OFF}$$

- $0 \leq t \leq 1 \mu s$

- Ipotesi di lavoro: D1 ON e D2 off

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 = \frac{6 \text{ k}\Omega}{24 \text{ k}\Omega} \cdot V_{in} = \frac{V_{in}}{4}$$

$$V_2(t) = \frac{V_{in}(t)}{4}, \quad V_{in}(t) = \frac{10 \text{ V}}{1 \mu s} \cdot t$$

$$V_u(t) = V_2(t) = \frac{1}{4} \cdot \frac{10 \text{ V}}{1 \mu s} \cdot t = 2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t$$

- Verifica delle ipotesi di lavoro:

$$V_{D1} = V_2(t) - R_2 \cdot I_1(t) = V_2(t) - V_2(t) = 0$$

$$I_1(t) = \frac{V_2(t)}{R_2} = 2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t \cdot \frac{1}{6 \text{ k}\Omega} > 0 \quad \text{OK D1 ON}$$

$$V_{D2} = V_L(t) - E_2 = 2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t - E$$

$$V_{D2} < 0 \rightarrow 2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t - E < 0$$

$$2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t < 2 \text{ V}$$

$$t < \frac{2}{2.5} \mu s = 0.8 \mu s$$

OK D2 off per  $0 \leq t \leq 0.8 \mu s$

- Riassumendo:

- $0 \leq t \leq 0.8 \mu s$  D1 on e D2 off

$$V_u(t) = 2.5 \frac{\text{V}}{\mu s} \cdot t$$

- $0.8 \mu s < t \leq 1 \mu s$  D1 on e D2 on.

$$V_u(t) = 2 \text{ V}$$

• 1ms < t ≤ 2ms

• Ipotesi di lavoro : D1 on e D2 on

$V_2 = 2V$       $V_u(t) = 2V$

• Verifica ipotesi di lavoro :

$V_{in}(t) = 10V - \frac{10V}{1ms} \cdot (t - 1ms)$

$V_{D1} = V_2 - R_2 I_1 = V_2 - V_2 = 0$   
 $I_1 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{2V}{6k\Omega} \approx 0,33 \text{ mA}$  } OK D1 on

$V_{D2} = V_2 - E = 0$

$I_2 = I - I_1$  ,      $I = \frac{V_1(t) - V_2}{R_1} = \frac{V_{in}(t) - V_2}{R_1}$

$I_2 = \frac{V_{in}(t)}{R_1} - \frac{V_2}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} > 0$

$I_2 = \frac{10V}{18k\Omega} - \frac{1}{18k\Omega} \cdot \frac{10V}{ms} (t - 1ms) - \frac{2V}{R_1 || R_2} > 0$

$I_2 = 0,55 \text{ mA} - 0,55 \frac{\text{mA}}{\text{ms}} (t - 1ms) - 0,44 \text{ mA} > 0$

$0,11 \text{ mA} > 0,55 \frac{\text{mA}}{\text{ms}} (t - 1ms)$

$t < 1ms + \frac{0,11 \text{ ms}}{0,55} = 1,2 \text{ ms}$

• Riassumendo :

• 1ms < t ≤ 1,2ms     D1 on e D2 on

$V_u(t) = 2V$

• 1,2ms < t ≤ 2ms     D1 on e D2 off

$V_u(t) = \frac{V_{in}(t)}{4}$

$$V_u(t) = 2.5V - 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 1\mu s)$$

•  $2\mu s < t \leq 4\mu s$

• Ipotesi di lavoro:  $D_1$  e  $D_2$  off

$$V_2(t) = V_1(t) = V_{in}(t) = \begin{cases} -\frac{5V}{\mu s} (t - 2\mu s) & 2\mu s < t \leq 3\mu s \\ -5V + \frac{5V}{\mu s} (t - 3\mu s) & 3\mu s < t \leq 4\mu s \end{cases}$$

$$V_u(t) = V_2(t) = V_{in}(t)$$

• Verifica delle ipotesi di lavoro:

$$V_2(t) < 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{D1} = V_2 - R \cdot I_1 < 0 \quad \text{OK } D_1 \text{ off} \\ V_{D2} = V_2 - E < 0 \quad \text{OK } D_2 \text{ off} \end{array} \right.$$

•  $4\mu s < t \leq 4.5\mu s$

• Ipotesi di lavoro:  $D_1$  on e  $D_2$  off

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 = \frac{V_1}{4} = \frac{V_{in}}{4}$$

$$V_{in}(t) = \frac{10V}{\mu s} \cdot (t - 4\mu s)$$

$$V_u(t) = V_2(t) = 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 4\mu s)$$

$$V_{2 \text{ max}} = V_2(t = 4.5\mu s) = 1.25V$$

• Verifica ipotesi di lavoro:

$$\left. \begin{array}{l} V_{D1} = V_2 - R_2 \cdot I_1 = V_2 - V_2 = 0 \\ I_1 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{2.5V}{\mu s} \cdot \frac{1}{6k\Omega} (t - 4\mu s) > 0 \end{array} \right\} \text{OK } D_1 \text{ on}$$

$$V_{D2} = V_2 - E = 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 4\mu s) - 2V < 0 \quad (V_{2 \text{ max}} = 1.25V) \\ \text{OK } D_2 \text{ off}$$

•  $4.5 \mu s < t \leq 5 \mu s$

• Ipotesi di lavoro:  $D_1$  on e  $D_2$  off

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 = \frac{V_{in}}{4}$$

$$V_{in}(t) = 5V - 10 \frac{V}{\mu s} (t - 4.5 \mu s)$$

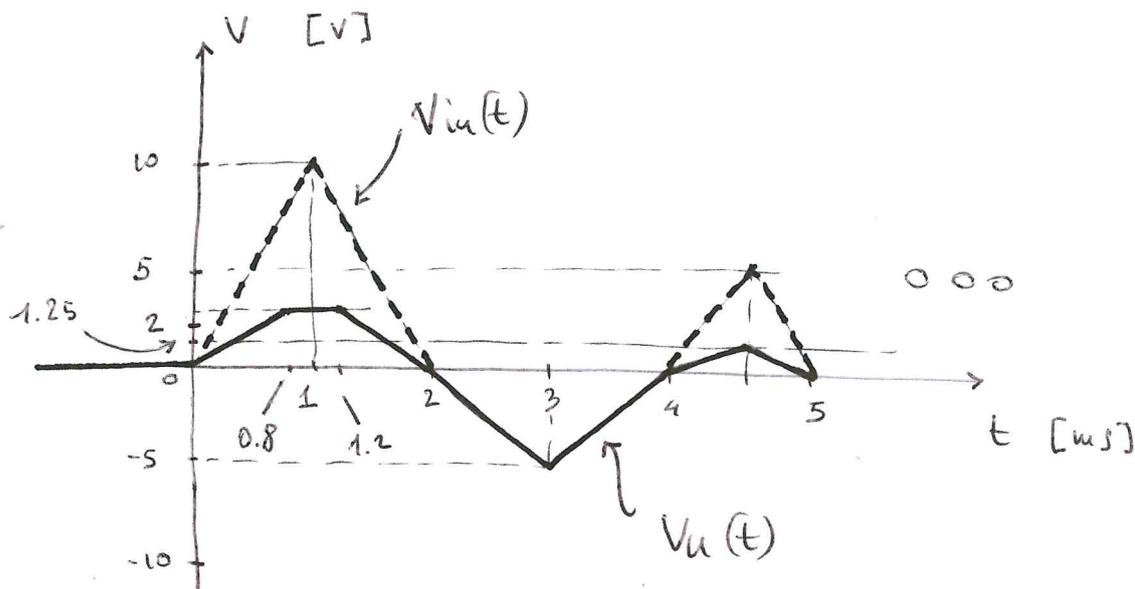
$$V_u(t) = V_2(t) = 1.25V - 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 4.5 \mu s)$$

• Verifichiamo ipotesi di lavoro:

$$V_{D1} = V_2 - R_2 \cdot I_1 = V_2 - V_2 = 0$$

$$I_1 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{1}{6k\Omega} \cdot \left[ 1.25V - 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 4.5 \mu s) \right] > 0 \quad \left. \vphantom{I_1} \right\} \begin{array}{l} \text{OK} \\ D_1 \text{ on} \end{array}$$

$$V_{D2} = V_2 - E = 1.25V - 2.5 \frac{V}{\mu s} (t - 4.5 \mu s) - 2V < 0 \quad \text{OK } D_2 \text{ off}$$



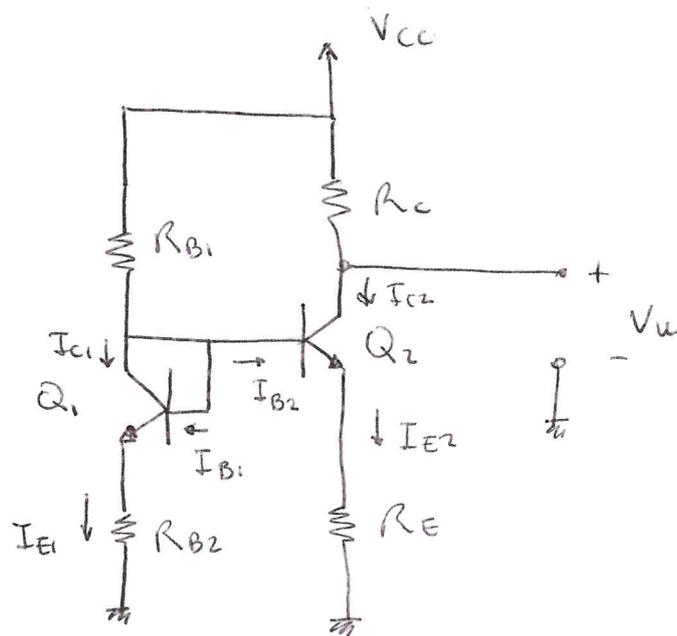
• Il comportamento descritto si ripete per tutti i periodi successivi al primo.

———— x ————

• Es 2

• Ipotesi di lavoro:

$Q_1$  e  $Q_2$  ZAD



•  $B_1 \equiv C_1 \rightarrow V_{CE1} = V_{BE1} > V_{CESAT}$  OK  $Q_1$  ZAD

•  $V_{CC} = R_{B1} \cdot [I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}] + V_{BE1} + I_{E1} \cdot R_{B2}$

$$V_{CC} = R_{B1} \cdot [I_{B1} (h_{FE} + 1) + I_{B2}] + V_{BE1} + (h_{FE} + 1) \cdot R_{B2} \cdot I_{B1}$$

$$V_{CC} = (R_{B1} + R_{B2}) (h_{FE} + 1) \cdot I_{B1} + R_{B1} \cdot I_{B2} + V_{BE1}$$

•  $V_{BE1} + R_{B2} \cdot I_{E1} = V_{BE2} + R_E \cdot I_{E2}$

$$R_{B2} (h_{FE} + 1) I_{B1} = R_E (h_{FE} + 1) I_{B2}$$

$$I_{B2} = \frac{R_{B2}}{R_E} \cdot I_{B1}$$

• Quindi:

$$V_{CC} = \left[ (R_{B1} + R_{B2}) \cdot (h_{FE} + 1) + \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_E} \right] \cdot I_{B1} + V_{BE1}$$

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{(R_{B1} + R_{B2}) (h_{FE} + 1) + \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_E}} = \frac{20V - 0.7V}{50k\Omega \cdot 101 + \frac{45k\Omega \cdot 5k\Omega}{0.2k\Omega}} \approx 3.125 \mu A$$

$$I_{B2} \approx \frac{5 \text{ k}\Omega}{0.2 \text{ k}\Omega} \cdot 3.125 \mu\text{A} \approx 78.125 \mu\text{A}$$

$$I_{C1} = h_{FE} \cdot I_{B1} \approx 100 \cdot 3.125 \mu\text{A} = 0.3125 \text{ mA}$$

$$I_{E1} = (h_{FE} + 1) I_{B1} = 101 \cdot 3.125 \mu\text{A} \approx 0.3156 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = h_{FE} I_{B2} \approx 100 \cdot 78.125 \mu\text{A} = 7.8125 \text{ mA}$$

$$I_{E2} = (h_{FE} + 1) I_{B2} \approx 101 \cdot 78.125 \mu\text{A} \approx 7.891 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = R_{C2} \cdot I_{C2} + V_{CE2} + R_E \cdot I_{E2}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - R_{C2} I_{C2} - R_E \cdot I_{E2} =$$

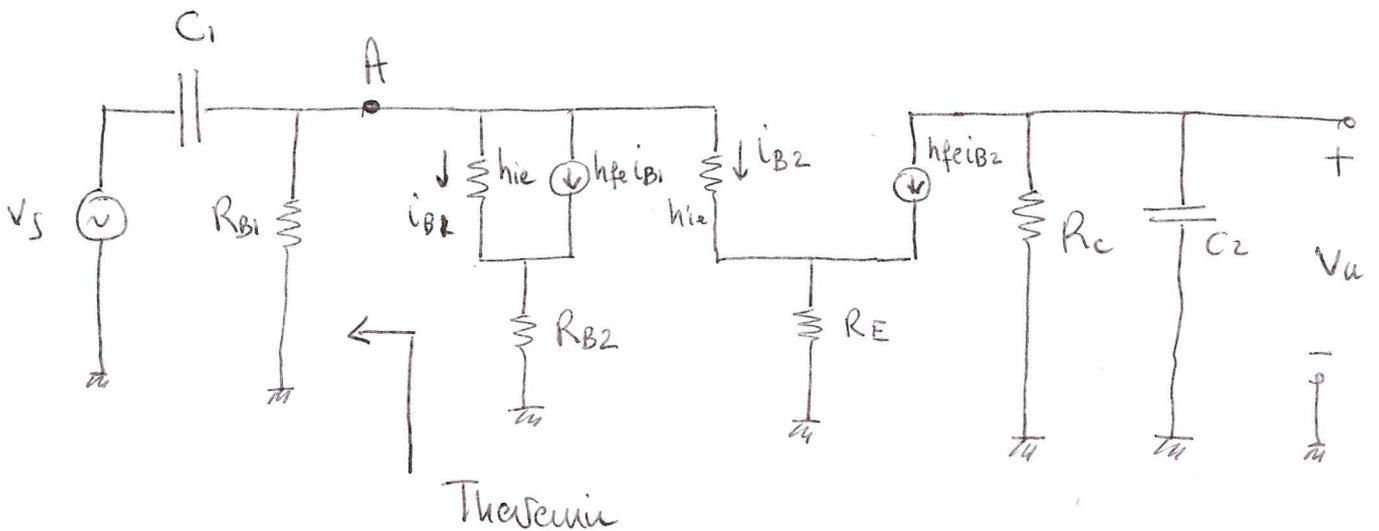
$$= 20 \text{ V} - 1 \text{ k}\Omega \cdot 7.8125 \text{ mA} - 0.2 \cdot \text{k}\Omega \cdot 7.891 \text{ mA} =$$

$$\approx 10.61 \text{ V}$$

$$V_{CE2} \approx 10.61 \text{ V} > V_{CE\text{sat}} \quad \underline{\text{OK } Q_2 \text{ in ZAD}}$$

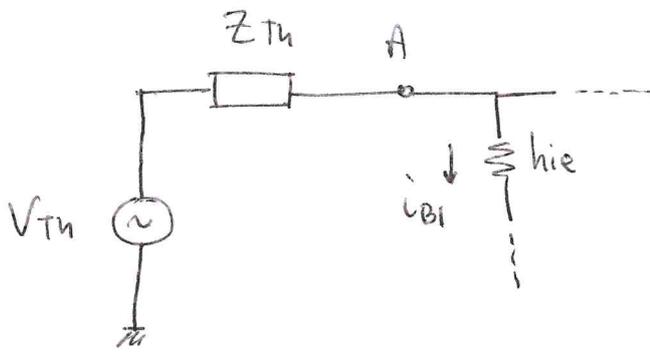
\_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_

• E5 3



$$Z_{Th} = \frac{R_{B1} \cdot \frac{1}{C_1 s}}{R_{B1} + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_{B1}}{1 + R_{B1} C_1 s}$$

$$V_{Th} = \frac{R_{B1} C_1 s}{R_{B1} C_1 s + 1} \cdot V_S$$



$$\bullet \quad h_{ie} i_{B1} + R_{B2} \cdot (h_{fe} + 1) i_{B1} = h_{ie} i_{B2} + R_E (h_{fe} + 1) i_{B2}$$

$$i_{B2} = i_{B1} \cdot \frac{h_{ie} + R_{B2}(1 + h_{fe})}{h_{ie} + R_E(1 + h_{fe})} = i_{B1} \cdot K$$

$$\bullet \quad V_{Th} = Z_{Th} [i_{B1} + h_{fe} i_{B1} + i_{B2}] + [h_{ie} + R_{B2}(1 + h_{fe})] \cdot i_{B1}$$

$$V_{Th} = Z_{Th} [(h_{fe} + 1) + K] \cdot i_{B1} + [h_{ie} + R_{B2}(1 + h_{fe})] i_{B1}$$

$$i_{B1} = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} [K + (h_{fe} + 1)] + h_{ie} + R_{B2}(h_{fe} + 1)}$$

• Quindi:

$$i_{B2} = i_{B1} \cdot K = \frac{K \cdot V_{Th}}{Z_{Th} [K + (h_{fe} + 1)] + h_{ie} + R_{B2}(h_{fe} + 1)}$$

$$\bullet \quad V_u = - h_{fe} i_{B2} \cdot \frac{R_c \cdot \frac{1}{C_2 s}}{R_c + \frac{1}{C_2 s}} =$$

$$= - \frac{h_{fe} \cdot R_c}{1 + R_c C_2 s} \cdot i_{B2} =$$

$$= - \frac{h_{fe} \cdot R_c}{1 + R_c \cdot C_2 \cdot s} \cdot \frac{K}{Z_{Th} [K + (h_{fe} + 1)] + h_{ie} + R_{B2} \cdot (h_{fe} + 1)} \cdot \frac{R_{B1} C_1 s}{R_{B1} C_1 s + 1} \cdot V_s$$

$$\frac{V_u}{V_s} = - \frac{h_{fe} \cdot R_c}{1 + R_c \cdot C_2 \cdot s} \cdot \frac{k R_{B1} C_1 s}{(1 + R_{B1} C_1 s)} \cdot \frac{(1 + R_{B1} C_1 s)}{R_{B1} [k + (h_{fe} + 1)] + (1 + R_{B1} C_1 s) [h_{ie} + R_{B2} (h_{fe} + 1)]}$$

$$\frac{V_u}{V_s} = - \frac{h_{fe} \cdot R_c \cdot k \cdot R_{B1} C_1 s}{(1 + R_c \cdot C_2 \cdot s) \cdot [h_{ie} + R_{B1} [k + (h_{fe} + 1)] + R_{B2} (h_{fe} + 1) + [h_{ie} + R_{B2} (h_{fe} + 1)] R_{B1} C_1 s]}$$

$$A_V = \frac{V_u}{V_s} = \frac{A \cdot s}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

$$A = - \frac{h_{fe} \cdot R_c \cdot k \cdot R_{B1} C_1}{h_{ie} + R_{B1} [k + (h_{fe} + 1)] + R_{B2} \cdot (h_{fe} + 1)} \approx - 11,69 \text{ mrad/s}$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{R_c \cdot C_2} = \frac{1}{10^3 \Omega \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ F}} \approx 333,33 \text{ rad/s}$$

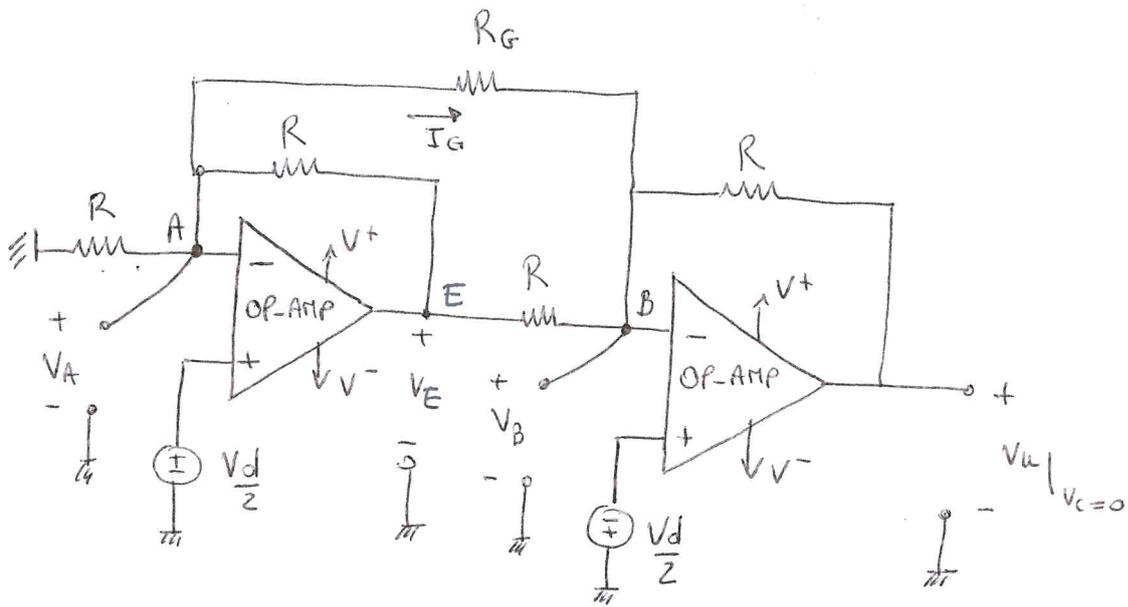
$$\omega_{P2} = \frac{h_{ie} + R_{B1} [k + (h_{fe} + 1)] + R_{B2} (h_{fe} + 1)}{[h_{ie} + R_{B2} (h_{fe} + 1)] \cdot R_{B1} \cdot C_1} \approx 19,75 \text{ Krad/s}$$

————— x —————

• Es 4  $V_u = A_1 \cdot V_1 + A_2 \cdot V_2 = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$  ,  $A_d = \frac{V_u}{V_d} \Big|_{V_c=0}$

$$\begin{cases} V_d = V_1 - V_2 \\ V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = \frac{V_d}{2} + V_c \\ V_2 = -\frac{V_d}{2} + V_c \end{cases}$$

• Per determinare l'amplificazione differenziale si sostituiscono i segnali di ingresso con i generatori  $V_c$  e  $V_d/2$  e si valuta l'effetto sull'uscita dei solo generatori  $V_d/2$ :



- $V_A = V_{OP-AMP}^- = V_{OP-AMP}^+ = \frac{V_d}{2}$  C.C.V
- $V_B = V_{OP-AMP}^- = V_{OP-AMP}^+ = -\frac{V_d}{2}$  C.C.V.
- $I_G = \frac{V_A - V_B}{R_G} = \frac{V_d/2 + V_d/2}{R_G} = \frac{V_d}{R_G}$

• Nodo A :

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{V_d}{2} + I_G = \left( V_E - \frac{V_d}{2} \right) \cdot \frac{1}{R}$$

$$\frac{V_d}{2} + R \cdot \frac{V_d}{R_G} = V_E - \frac{V_d}{2} \rightarrow V_E = V_d \cdot \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right]$$

• Nodo B :

$$\left( V_E + \frac{V_d}{2} \right) \cdot \frac{1}{R} + I_G = \left( -\frac{V_d}{2} - V_u \right) \cdot \frac{1}{R}$$

$$V_E + \frac{V_d}{2} + \frac{R}{R_G} \cdot V_d = -\frac{V_d}{2} - V_u$$

$$V_u = -V_E - V_d - \frac{R}{R_G} V_d = -V_d \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] - V_d \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right]$$

$$V_u = -2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot V_d$$

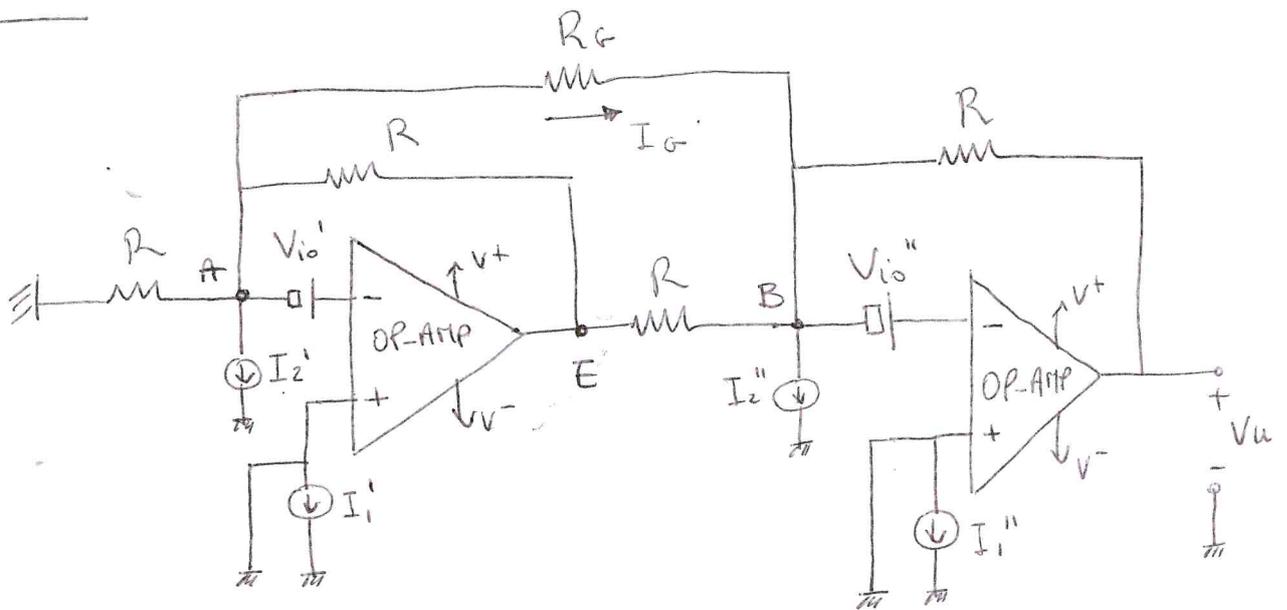
• Quindi:

$$V_u \Big|_{V_c=0} = A_d \cdot V_d = -2 \cdot \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot V_d$$

$$A_d = -2 \cdot \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] = -2 \left[ 1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{2.5 \text{ k}\Omega} \right] = -10$$

$$A_d = -10$$

• Es 5



• Applicazione del PSE:

• I1' ed I2'' non producono effetti sull'uscita

• Effetto Vio':

•  $V_B = 0 \rightarrow I_G = -\frac{V_{io}'}{R_G}$

•  $(V_E + V_{io}') \frac{1}{R} + \frac{V_{io}'}{R} = I_G \rightarrow V_E = -V_{io}' \left[ 2 + \frac{R}{R_G} \right]$

•  $\frac{V_E}{R} + I_G = -\frac{V_u}{R} \rightarrow V_u \Big|_{V_{io}'} = 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot V_{io}'$

- Effetto  $I_2'$

- $V_B = 0$
- $V_A = 0$

$$\left. \begin{array}{l} V_B = 0 \\ V_A = 0 \end{array} \right\} \rightarrow I_G = 0$$

- $V_E = R \cdot I_2'$

- $V_u|_{I_2'} = -\frac{R}{R} \cdot V_E = -R \cdot I_2'$

- Effetto  $V_{io}''$

- $V_A = 0 \rightarrow I_G = \frac{V_{io}''}{R_G}$

- $V_E = R \cdot I_G = \frac{R}{R_G} \cdot V_{io}''$

- $\frac{+V_{io}'' + V_E}{R} + I_G = -\frac{V_{io} - V_u}{R} \rightarrow V_u|_{V_{io}''} = -2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] V_{io}''$

- Effetto  $I_2''$

- $V_B = 0$
- $V_A = 0$

$$\left. \begin{array}{l} V_B = 0 \\ V_A = 0 \end{array} \right\} \rightarrow I_G = 0, V_E = 0$$

- $V_u|_{I_2''} = R \cdot I_2''$

- Risultato

$$V_u = 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot V_{io}' - R \cdot I_2' - 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot V_{io}'' + R \cdot I_2''$$

$$V_u = 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot (V_{io}' - V_{io}'') + R (I_2'' - I_2') =$$

$$= 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot (V_{io}' - V_{io}'') + R \cdot \left[ \cancel{I_B}'' - \frac{I_{io}''}{2} - \cancel{I_B}' + \frac{I_{io}'}{2} \right] =$$

$$= 2 \left[ 1 + \frac{R}{R_G} \right] \cdot (V_{io}' - V_{io}'') + \frac{R}{2} [I_{io}' - I_{io}'']$$

- Massimo sbilanciamento:

$$V_{io}' = 5 \text{ mV} , V_{io}'' = -5 \text{ mV}$$

$$I_{io}' = 20 \text{ nA} , I_{io}'' = -20 \text{ nA}$$

$$\begin{aligned} V_{u \text{ max}} &= 2 \cdot \left[ 1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{2.5 \text{ k}\Omega} \right] \cdot 10 \text{ mV} + \frac{10 \text{ k}\Omega}{2} \cdot 40 \text{ nA} = \\ &= 100 \text{ mV} + 0.2 \text{ mV} = 100,2 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{u \text{ max}} = 100,2 \text{ mV}$$

- Minimo sbilanciamento:

$$V_{io}' = -5 \text{ mV} , V_{io}'' = 5 \text{ mV}$$

$$I_{io}' = -20 \text{ nA} , I_{io}'' = 20 \text{ nA}$$

$$V_{u \text{ min}} = -100,2 \text{ mV}$$

\_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_