

# Esercitazioni di CIRCUITI ELETTRONICI ANALOGICI L-A

Anno Accademico 2006/2007

## Esercitazione N. 5

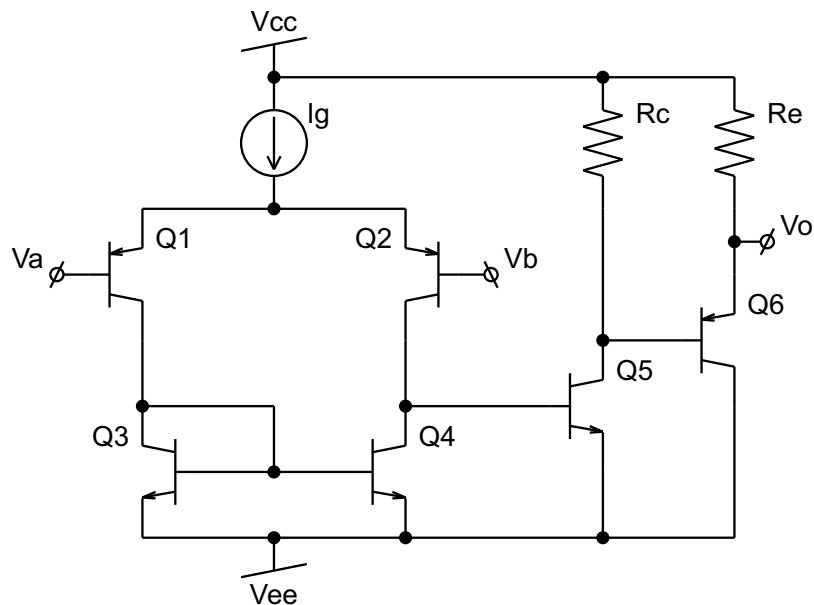


Figura 1: Amplificatore operazionale

### Cascata di stadi amplificatori

I transistori che compaiono nel circuito di figura 1 sono caratterizzati dai seguenti parametri:  $I_s = 0.1 \text{ fA}$ ,  $V_{AF} = 100 \text{ V}$ ,  $V_T = 25 \text{ mV}$ ,  $V_{\text{sat}}^{\text{ec,p}} = V_{\text{sat}}^{\text{ce,n}} = 0.1 \text{ V}$ ,  $\beta_{f,p} = 80$ ,  $\beta_{f,n} = 100$ . Si ha inoltre  $V_{cc} = 5 \text{ V}$  e  $V_{ee} = -5 \text{ V}$ .

Nella risoluzione dell'esercitazione si utilizzi per tutti i transistori il modello esponenziale e non si trascurino le correnti di base. Ove non diversamente indicato nel testo, si trascuri per tutti i transistori, l'effetto Early.

Nelle simulazioni PSpice<sup>®</sup> si utilizzino i seguenti modelli per i transistori BJT:

```
.model n npn is=10e-17 bf=100 vaf=100  
.model p pnp is=10e-17 bf=80 vaf=100
```

1. Calcolare il valore di  $R_e$  per cui si ha  $I_{b,6} = 280 \mu A$  quando  $Q_5$  entra in saturazione.
2. Calcolare il valore di  $R_c$  per cui, nelle condizioni del punto precedente, si ha  $I_{c,5} = 530 \mu A$ .
3. Calcolare il valore minimo della corrente che deve essere erogata dal generatore di corrente  $I_g$  affinché  $Q_5$  raggiunga la saturazione.
4. Calcolare il valore della tensione  $V_a$  per cui, con  $V_b = 0 V$ , si ha  $V_o = 0 V$ .
5. È possibile, sostituendo lo specchio formato dai transistori  $Q_3$  e  $Q_4$  con uno specchio con resistenze di emettitore su entrambi i rami, far sì che si abbia  $V_o = 0 V$  con  $V_a = 0 V$  e  $V_b = 0 V$ ? Motivare la risposta e, in caso negativo, proporre una soluzione anche tenendo conto dell'effetto Early.
6. Tramite simulazione con PSpice<sup>®</sup> verificare quanto la tensione  $V_a$  si discosta dal valore ideale calcolato al punto precedente.
7. Sostituire il generatore di corrente  $I_g$  con uno basato sullo specchio di Wilson con resistenza di emettitore, dimensionando la resistenza in modo tale che il ramo di comando assorba  $1 \mu A$ .
8. Tramite simulazione con PSpice<sup>®</sup> graficare l'andamento delle correnti di base dei transistori  $Q_1$  e  $Q_2$  e riportare il valore massimo.
9. Utilizzando il seguente frammento di netlist per impostare le tensioni di ingresso  $V_a$  e  $V_b$ , calcolare il guadagno di tensione  $v_o/v_d$  e  $v_o/v_{cm}$ .

```

Vd d 0
Vcm cm 0
Ea a 0 value={V(cm)+V(d)/2}
Eb b 0 value={V(cm)-V(d)/2}

```

## Soluzioni

1. Essendo nota la corrente di base di  $Q_6$ , è possibile calcolare la  $V_{be}$  tramite la legge logaritmica. Inoltre, essendo  $Q_5$  in saturazione, anche la sua  $V_{ce}$  è nota. Si ha dunque:

$$R_e = \frac{V_{cc} - V_{be,6} - V_{ce,5}^{sat} - V_{ee}}{(\beta_f + 1)I_{b,6}} \simeq 400 \Omega$$

2. Tramite bilancio delle correnti sul collettore di  $Q_5$  si ha:

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{ce,5}^{sat} - V_{ee}}{I_{c,5} - I_{b,6}} \simeq 39.6 \text{ k}\Omega$$

3. Avendo calcolato la corrente di collettore di  $Q_5$  quando questi entra in saturazione, la sua corrente di base sarà ancora in rapporto ad essa tramite il fattore  $1/\beta_{f,n}$  e dunque pari a  $5.3 \mu\text{A}$ . Poichè la coppia differenziale può al massimo erogare  $\frac{\beta_{f,p}I_g}{\beta_{f,p}+1}$  quando il solo ramo di destra è attivo, il valore minimo della corrente  $I_g$  è pari a circa  $5.37 \mu\text{A}$ .
4. Supponendo tutti i transistori in RND ed iniziando ad esaminare il nodo di uscita, è possibile calcolare la corrente  $I_{e,6} = 12.5 \text{ mA}$  ricavando da essa, tramite relazione logaritmica, la tensione  $V_{eb,6} \simeq 811 \text{ mV}$ . Tramite bilancio di correnti è possibile calcolare la  $I_{c,5}$  e da essa la  $I_{b,5} \simeq 3.01 \mu\text{A}$ . Infine, tramite bilancio di correnti sullo specchio e sulla coppia differenziale si ottiene:

$$I_{c,1} = \frac{\beta_{f,p} + 2}{\beta_{f,n} + 1} \frac{\beta_{f,n}I_g - (\beta_{f,n} + 1)I_{b,5}}{2(\beta_{f,p} + 1)} \simeq 1.16 \mu\text{A} \rightarrow I_{c,2} \simeq 4.16 \mu\text{A}$$

Utilizzando queste correnti per calcolare le  $V_{eb}$  dei transistori della coppia differenziale si ricava il valore cercato per  $V_a \simeq 32 \text{ mV}$ .

5. L'analisi condotta con PSpice<sup>®</sup> riporta una tensione  $V_a \simeq 29.5 \text{ mV}$
6. No, non è possibile se non aumentando la corrente  $I_g$  erogata dal generatore di corrente. Infatti, se  $V_a = V_b$ , la coppia differenziale è perfettamente bilanciata e sui collettori dei transistori  $Q_1$ ,  $Q_2$  scorrono solo  $2.65 \mu\text{A}$ . Non è dunque possibile ottenere una corrente di  $3.01 \mu\text{A}$  da una relazione del tipo  $I_{c,2} - kI_{c,1}$  dove  $k$  è il rapporto fra le correnti dello specchio che sostituisce  $Q_3$  e  $Q_4$ .  
Portando la corrente  $I_g$  ad esempio a  $50 \mu\text{A}$  ed impostando una resistenza di uscita per lo specchio di  $250 \text{ M}\Omega$  è possibile fornire a  $Q_5$  la corrente necessaria scegliendo come resistenze  $R_1 \simeq 2.8 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 \simeq 3.2 \text{ k}\Omega$ .
7. Utilizzando le formule ricavate durante le esercitazioni in aula si ricava il valore per la resistenza dello specchio Wilson pari a  $R_w \simeq 11 \text{ k}\Omega$ . Volendo utilizzare una resistenza sul ramo di controllo al posto del generatore di corrente il suo valore è  $R_g \simeq 8.75 \text{ M}\Omega$ .
8. Il valore massimo di corrente che scorre sulla base di  $Q_1$  è pari a  $32.8 \mu\text{A}$  e si ottiene quanto  $V_a = -V_b = -5 \text{ V}$ . Al contrario, il valore massimo di corrente che scorre sulla base di  $Q_2$  è pari a  $49.3 \mu\text{A}$  e si ottiene quanto  $V_a = -V_b = 5 \text{ V}$ .
9. Si ottiene  $v_o/v_d \simeq 1.6 \cdot 10^3$  e  $v_o/v_{cm} \simeq 3.55 \cdot 10^{-3}$ .