

3 – Polarizzazione di un BJT

Prerequisiti: conoscenza dell'ambiente LTSpice

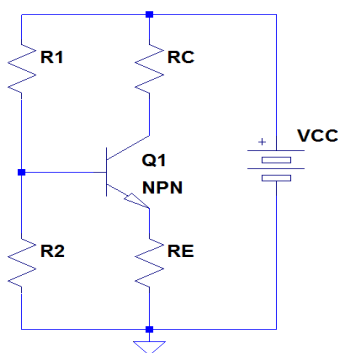
3.1 – Generalità

Lo scopo della polarizzazione (*biasing*) in un circuito amplificatore a BJT è innanzitutto quello di stabilire una corrente continua costante nel collettore¹ del BJT, che sia predicibile e insensibile alle variazioni di temperatura oltre che alle ampie variazioni di β presenti in transistor dello stesso tipo².

Un secondo, importante, obiettivo del progetto del circuito di polarizzazione di un amplificatore è quello di individuare una coppia di valori $[V_{CE}, I_C]$ (nel caso di un NPN) chiamato *punto di lavoro a riposo* (detto anche punto Q , punto di quiescenza), cioè in assenza di segnale in ingresso, situato nella regione attiva diretta delle caratteristiche di uscita V_{CE}, I_C che consenta anche la massima escursione del segnale; questa escursione è limitata, sull'asse delle ascisse, da due estremi, quello superiore rappresentato da V_{CC} e quello inferiore rappresentato dalla tensione di saturazione V_{CESAT} che è tipicamente intorno ai 0,2...0,3V. Se il picco positivo del segnale si estende oltre V_{CC} va a interessare la regione di interdizione; viceversa, se il picco negativo si protrae al di sotto dei 0,2...0,3V viene a trovarsi nella regione di saturazione. Uno “sconfinamento” del segnale al di fuori di questa escursione porta il transistor a lavorare in modo non lineare, un evento indesiderato che deve essere quanto più possibile scongiurato; perciò, un'escursione quanto più ampia possibile consente di ottenere una dinamica più elevata ovvero la possibilità di sfruttare quanta più regione attiva possibile.

3.2 – Un classico circuito di polarizzazione

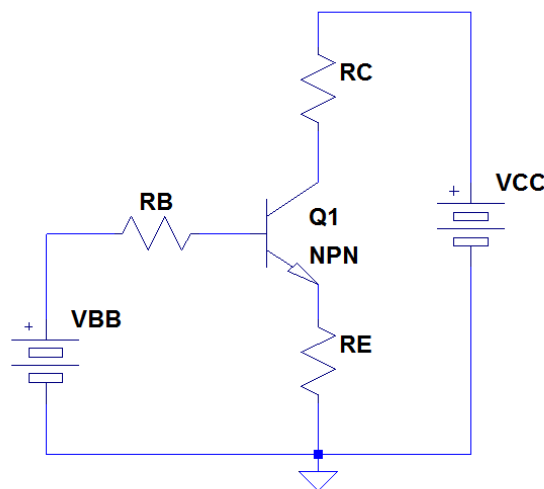
Di seguito viene raffigurato il circuito maggiormente impiegato per polarizzare un circuito a transistor NPN a singola alimentazione, che fa uso di quattro resistenze:



-
- 1 Il progetto del circuito di polarizzazione ha come obiettivo lo stabilizzare I_C oppure I_E , dal momento che $I_C = \alpha I_E$, con α che ha piccolissime variazioni. Dunque, una I_E stabile risulterà anche in una I_C stabile e viceversa. Ancora, il guadagno di uno stadio amplificatore emettitore comune dipende proporzionalmente dalla I_C a riposo; dunque un valore stabile di questa corrente significherà avere un guadagno altrettanto stabile.
 - 2 A.S. SEDRA, K.C. SMITH, Microelectronics CIRCUITS, Fifth Edition, p.436, Oxford University Press, New York, 2004.

La tecnica consiste nell'alimentare la base con una frazione della tensione di alimentazione V_{CC} , mediante un partitore di tensione R_1 , R_2 . In aggiunta, viene collegato all'emettitore un resistore R_E , il quale, come si vedrà più avanti, crea una reazione negativa che migliora la stabilità del sistema.

Lo studio del circuito di polarizzazione inizia applicando il Teorema di Thévenin alla rete a sinistra della base. Il partitore R_1, R_2 viene dunque sostituito dal generatore reale equivalente di Thévenin (il generatore reale è costituito da V_{BB} e R_B):



La tensione V_{BB} e la resistenza R_B sono così determinati:

$$V_{BB} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

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

V_{BB} , dunque, altro non è che la tensione ai capi di R_2 .

La corrente I_E può essere determinata scrivendo applicando il secondo principio di Kirchhoff alla maglia di sinistra:

$$V_{BB} = R_{BB} \cdot I_B + V_{BE} + (R_E \cdot I_E)$$

Poiché stiamo assumendo che il transistor operi in regione attiva diretta, risulta anche:

$$I_B = \frac{I_E}{(1 + \beta)}$$

Per cui abbiamo:

$$V_{BB} = \frac{R_{BB} \cdot I_E}{(1 + \beta)} + V_{BE} + (R_E \cdot I_E)$$

In definitiva, la corrente I_E vale:

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{(\beta + 1)}}$$

A questo punto, per rendere I_E quanto più insensibile alle variazioni di temperatura e di β , dobbiamo progettare il circuito in modo che siano rispettate due condizioni:

$$\begin{aligned} V_{BB} &\gg V_{BE} \\ R_E &\gg \frac{R_B}{\beta + 1} \end{aligned}$$

La **prima condizione** assicura che piccole variazioni della V_{BE} (che possiamo assumere, a riposo, uguale a 0,7V in zona attiva diretta) saranno trascurabili rispetto al più elevato valore di V_{BB} . Scegliendo, però, un elevato valore di V_{BB} diminuisce la caduta di tensione su RC (e quindi il guadagno di tensione). Si hanno, dunque, un insieme di condizioni che non possono essere tutte contemporaneamente rispettate; la soluzione deve dunque essere un compromesso. Come linea guida generale per il progetto si può assumere per V_{BB} una tensione pari a $1/3 V_{CC}$, V_{CE} circa pari a $1/3 V_{CC}$ e anche $R_E I_C$ pari a $1/3 V_{CC}$ ³.

La **seconda condizione** fa in modo che la corrente di emettitore sia indipendente da β . Se il punto di lavoro risulta indipendente da β (un parametro difficilmente controllabile) risulta anche indipendente dalla corrente di base il che si ottiene ponendo $I_2 \gg I_B$ ovvero $I_1 \approx I_2$. Questa condizione viene soddisfatta scegliendo un basso valore di R_B . Ciò può essere ottenuto scegliendo bassi valori di R_1 e R_2 . Bassi valori di queste resistenze, però, comportano correnti nel partitore più alte oltre ad abbassare la resistenza di ingresso dell'amplificatore a emettitore comune (ingresso sulla base)⁴. Un criterio è quello di limitare la corrente nel partitore fra $1/10$ e $1/5$ di I_E (oppure di I_C).

Vediamo come questo assetto circuitale stabilizzi la corrente continua di emettitore (e quindi anche quella di collettore) grazie alla reazione negativa fornita da R_E . Supponiamo che per una ragione qualsiasi la corrente di emettitore aumenti. La caduta di tensione su R_E aumenterà conseguenzialmente. Ora, se la tensione sulla base è determinata essenzialmente dal partitore R_1 e R_2 (il che equivale a dire che R_B è piccola) essa rimarrà costante, dunque all'aumento della caduta di tensione su R_E corrisponderà una diminuzione di V_{BE} . Ciò comporta una riduzione della corrente di collettore (e di emettitore). Perciò R_E fornisce una reazione negativa che stabilizza la corrente di polarizzazione.

³ A.S. SEDRA, K.C. SMITH, O.C., p. 438.

⁴ Valori di R_B di almeno $10k\Omega$ non alterano sensibilmente la resistenza di ingresso complessiva di uno stadio CE (essendo la resistenza dinamica di ingresso di uno stadio CE è nell'ordine di $1k\Omega \dots 2k\Omega$); diverso, invece, il caso dello stadio CE con resistenza degenera d'emettitore per il quale la resistenza dinamica di ingresso viene aumentata di circa β volte; in quest'ultimo caso occorre scegliere una corrente di partitore più piccola al fine di non alterare la resistenza intrinseca d'ingresso.

Nel circuito analizzato si è assunto un valore infinito per la tensione di Early. Se si include l'effetto Early (quell'effetto a causa del quale la I_C dipende anche dalla V_{CE}) l'analisi delle condizioni di polarizzazione risulta considerevolmente più complessa, mentre la variazione dei risultati è inferiore al 15 per cento. Nella maggior parte dei casi le tolleranze relative ai resistori e ai generatori rendono trascurabile l'errore che si commette ignorando il predetto effetto⁵.

3.2.1 – Progetto di una rete di polarizzazione

Progettare la rete di polarizzazione di un amplificatore a emettitore comune con 2N3904 ($\beta=300$). Si desidera una corrente $I_C=1\text{mA}$ con un'alimentazione $V_{CC}=+12\text{V}$.

Soluzione

Seguiamo la regola generale poc'anzi menzionata di allocare un terzo della tensione di alimentazione fra collettore ed emettitore ($V_{CE}=12/3$), un terzo ai capi del resistore R_C ($V_{RC}=12/3$) e un terzo per la tensione V_{BB} ovvero la tensione ai capi di R_2 ($V_2=12/3$). Inoltre, trascuriamo l'effetto Early. Pertanto abbiamo:

$$V_{CE}=4\text{V}$$

$$V_{BB}=4\text{V}$$

$$V_{RC}=4\text{V}$$

Il punto di lavoro è identificato, dunque, dalla coppia di valori [4V, 1mA]

Supponendo che il transistor si trovi nella regione attiva diretta possiamo porre $V_{BE}=0,7\text{V}$ oltre che esprimere la corrente di base come:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1\text{mA}}{300} = 3,33 \mu\text{A}$$

Da cui:

$$I_E = I_B + I_C = 1,033 \text{mA}$$

Considerando il circuito semplificato con Thevenin abbiamo che :

$$R_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_E} = \frac{3,36 \text{V}}{1,033 \text{mA}} = 3,25 \text{k}\Omega$$

e quindi la tensione ai capi di R_E risulta essere:

$$V_E = R_E \cdot I_E = 3,25 \cdot 10^3 \cdot 1,033 \cdot 10^{-3} = 3,36 \text{V}$$

⁵ R.C. JAEGER, O.C., p.189

Assumendo una corrente di partitore ($I_1 \approx I_2$) pari a 1/5 di quella di collettore, trascurando dunque la corrente di base troviamo che:

$$R_1 + R_2 = \frac{12V}{0,2mA} = 60k\Omega$$

Ma essendo VBB la stessa tensione ai capi di R2, siamo subito in grado di calcolare quest'ultima:
Da cui segue:

$$R_2 = \frac{V_{BB}}{I_2} = \frac{4V}{0,2mA} = 20k\Omega$$

e:

$$R_1 = (60 - 20)k\Omega = 40k\Omega$$

Resta da calcolare R_C , che è data da:

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} = \frac{4,7V}{1mA} = 4,7k\Omega$$

Le due condizioni sopracitate sono rispettate:

$$4 \gg 0,7 \quad (\text{ossia } V_{BB} \gg V_{BE})$$

$$3250\Omega \gg 44,3\Omega \quad (\text{ossia } R_E \gg R_B/(1+\beta))$$

Il transistor, infine, risulta essere effettivamente polarizzato nella regione attiva diretta, dal momento che:

$$V_{CB} = V_C - V_{BB} = (V_{CE} - V_E) - V_{BB} = (4 - 3,3) - 4 = -3,3V < 0; V_{BE} = 0,7V$$

Riepilogando e utilizzando resistenze di valore standard (serie E96, tolleranza del 2%), abbiamo:

$$R_1 = 40,2k\Omega, R_2 = 20k\Omega, R_E = 3,24k\Omega, R_C = 4,75k\Omega$$

3.2.2 Netlist Spice

```
* BIAS.CIR
Q1 C B E 0 2N3904
RC V+ C 4.75K
RE E 0 3.24K
R2 B 0 20K
R1 V+ B 40.2K
VCC V+ 0 12V
.MODEL 2N3904 NPN(IS=1E-14 VAF=100 Bf=300 IKF=0.4 XTB=1.5
+ BR=4 CJC=4E-12 CJE=8E-12 RB=20 RC=0.1 RE=0.1
+ TR=250E-9 TF=350E-12 ITF=1 VTF=2 XTF=3
+ Vceo=40 Icrating=200m mfg=Philips
.OP
.END
```

3.2.3 – Risultati della simulazione

--- Operating Point ---

V(v+) :	12	voltage
V(b) :	3.94299	voltage
V(c) :	7.19501	voltage
V(e) :	3.28811	voltage
Ic(Q1) :	0.00101158	device_current
Ib(Q1) :	3.27368e-006	device_current
Ie(Q1) :	-0.00101485	device_current
I(Re) :	0.00101485	device_current
I(Rc) :	0.00101158	device_current
I(R2) :	0.000197149	device_current
I(R1) :	0.000200423	device_current
I(V1) :	-0.001212	device_current

Dai risultati ricaviamo che:

$$V_{CE}=3,9V, V_{BB}=3,94V, V_E=3,29V$$

$$I_C=1,011mA, I_B=3,27\mu A, I_E=1,014mA$$

Valori molto vicini a quelli calcolati senza tenere conto dell'effetto Early