

scheda integrativa **14A** 1

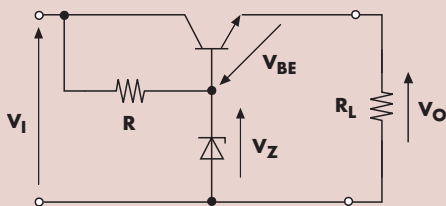
**Stabilizzatori lineari a BJT**

Il principale inconveniente dello stabilizzatore a resistenza e zener (sezione 11A) consiste nel fatto che lo zener è soggetto a grosse variazioni di corrente, confrontabili con quelle del carico, e che quindi, a causa della sua resistenza differenziale, è difficile ottenere una buona stabilizzazione. Il problema può essere risolto *lasciando allo zener la sola funzione di fornire la tensione di riferimento mentre la funzione di confronto tra questa tensione e quella di uscita e la funzione di controllo vengono svolte da un BJT.*

Un esempio di circuito di questo tipo è riportato in **figura 1**. In questo circuito *la corrente nello zener è soggetta a variazioni molto ridotte, rispetto a quelle della corrente nel carico*, risultando influenzata solo dalle variazioni di  $I_B$  che sono  $h_{FE}$  volte più piccole di quelle di  $I_C$ , che è appunto la corrente nel carico. La tensione di uscita risulta:

$$V_O = V_Z - V_{BE} \quad (1)$$

e, quindi, poiché la limitata variazione di  $I_Z$  riduce le variazioni di  $V_Z$ , anche la  $V_O$  presenta una più elevata stabilità, rispetto al caso di stabilizzatore a resistenza e zener. Va inoltre osservato che, siccome la  $V_Z$  è influenzata anche dalle variazioni di temperatura dello zener, la più limitata escursione di corrente riduce anche l'escursione termica dello zener per effetto Joule e quindi anche la variazione di  $V_O$  si riduce in conseguenza. Come già detto, il BJT svolge la duplice funzione di confronto e controllo, e questo può essere meglio compreso osservando che *il BJT è inserito in una configurazione a collettore comune*, ovvero in un circuito a *retroazione negativa*: la tensione  $V_{BE}$  è pari a  $V_Z - V_O$  (confronto) e quindi, supposta  $V_Z$  costante, se, per esempio, la  $V_O$  tende ad aumentare, la  $V_{BE}$  diminuisce e, in conseguenza, si riduce la  $I_B$  e quindi anche la  $V_O$  che così si compensa (controllo). Per i dettagli sul collettore comune vedere la sezione 21A del fascicolo per elettronica. Si osservi anche che lo stabilizzatore a resistenza e zener è un **regolatore di tipo parallelo**, essendo lo zener in parallelo al carico. Viceversa il circuito di **figura 1** è un esempio di **regolatore di tipo serie**, essendo il BJT di controllo in serie al carico (trascurando  $I_B$  rispetto a  $I_C$ ).



**Figura 1** Regolatore di tipo serie a BJT.

Queste considerazioni introduttive possono essere meglio capite con la successiva analisi teorica dei fattori di stabilità.

**Stabilità rispetto alla  $V_I$ .** Supposta trascurabile la corrente di base rispetto a quella dello zener, detta  $r_Z$  la resistenza differenziale dello zener, si ottiene:

$$\Delta V_Z = \Delta V_I \frac{r_Z}{r_Z + R} \quad (2)$$

Trascurando  $V_{BE}$  rispetto a  $V_Z$  e  $V_O$  si può porre  $\Delta V_O = \Delta V_Z$  e quindi risulta:

$$S_V = \frac{r_Z}{r_Z + R} \quad (3)$$

Come si vede, *per avere una buona stabilizzazione nei confronti della tensione di rete è importante che lo zener presenti una piccola resistenza differenziale* e che la  $I_Z$  sia la più piccola possibile, per potere porre  $R$  grande (naturalmente a parità di  $r_Z$ ).

Osservando i data sheet si vede che gli zener con resistenza differenziale più piccola sono quelli con  $V_Z$  di 7÷8 V.

**Stabilità rispetto al carico.** Per avere una buona stabilità della  $V_O$  al variare del carico è opportuno che  $h_{FE}$  sia elevato, infatti in questo caso a grandi variazioni di  $I_C$  corrisponderanno più contenute variazioni di  $I_B$  ( $I_B = I_C/h_{FE}$ ) e quindi di  $I_Z$  ovvero di  $V_Z$ .

Più rigorosamente si può osservare che il fattore  $S_I$  può essere fatto coincidere con la resistenza in uscita dell'alimentatore e che pertanto, supposta la  $R$  molto maggiore di  $r_Z$ , risulta:

$$S_I \approx R_o = \frac{h_{ie} + (r_Z // R)}{1 + h_{fe}} \approx \frac{h_{ie} + r_Z}{1 + h_{fe}} \approx \frac{0,026}{I_B} + r_Z \quad (4)$$

Come si vede, *per avere una bassa resistenza di uscita*, ovvero una buona stabilità nei confronti del carico, *è importante usare BJT con elevato  $h_{fe}$  (o  $h_{FE}$ )*.

La giustificazione della (4) è rinviata all'eventuale studio dell'amplificatore a collettore comune.

**Stabilità termica.** La temperatura influenza la tensione di uscita, infatti la  $V_{BE}$  diminuisce di 2,5 mV per ogni °C di aumento, mentre la  $V_Z$  varia in relazione al suo coefficiente di temperatura. Ricordando la (1) possiamo scrivere:

$$\Delta V_O = \Delta V_Z - \Delta V_{BE} \quad (5)$$

Detto  $TK_{V_Z}$  il **coefficiente di temperatura dello zener**:

$$TK_{V_Z} = \frac{\Delta V_Z}{\Delta T \cdot V_{Znom}} \quad (6)$$

e, ricordando che la  $V_{BE}$  diminuisce di 2,5 mV per ogni °C di aumento, si ottiene:

$$\Delta V_O = TK_{V_Z} \cdot V_Z \cdot \Delta T + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T \quad (7)$$

ovvero:

$$S_T = \frac{\Delta V_O}{\Delta T} = TK_{V_Z} \cdot V_Z + 2,5 \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Per una buona stabilità termica è quindi utile usare zener a coefficiente di temperatura negativo e tale che  $TK_{V_Z} V_Z \approx -2,5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ .

### Utilità della configurazione Darlington

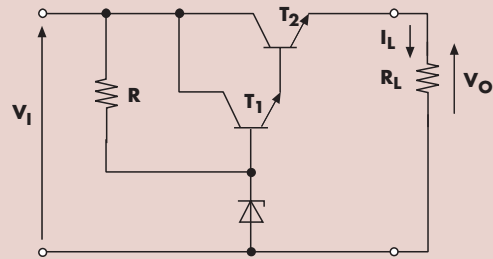
Come si è già detto analizzando la (4), per avere una bassa resistenza di uscita e quindi una buona stabilità nei confronti del carico, il BJT deve avere un elevato  $h_{FE}$ . In altri termini è importante che il rapporto  $I_C/I_B = h_{FE}$ , per qualsiasi valore di  $I_C$ , sia abbastanza alto da rendere poco significativo l'effetto di  $I_B$  su  $I_Z$ .

In ultima analisi si devono utilizzare BJT a elevato  $h_{FE}$  e quindi, qualora la corrente nel carico assuma valori abbastanza grandi, si rende necessario ricorrere alla configurazione Darlington come in **figura 2** (vedi l'esempio 1 della teoria e l'approfondimento 14A.1).

Per maggiore chiarezza si tenga presente che i BJT di potenza presentano un  $h_{FE}$  mediamente piccolo rispetto a quello dei BJT per piccoli segnali.

La struttura Darlington di **figura 2** unisce un BJT di potenza ( $T_2$ ) a un BJT per piccoli segnali ( $T_1$ ) e si può ritenere equivalente a un unico BJT con  $h_{FE}$

pari al prodotto dei due  $h_{FE}$ .



**Figura 2** Regolatore di tipo serie con Darlington.

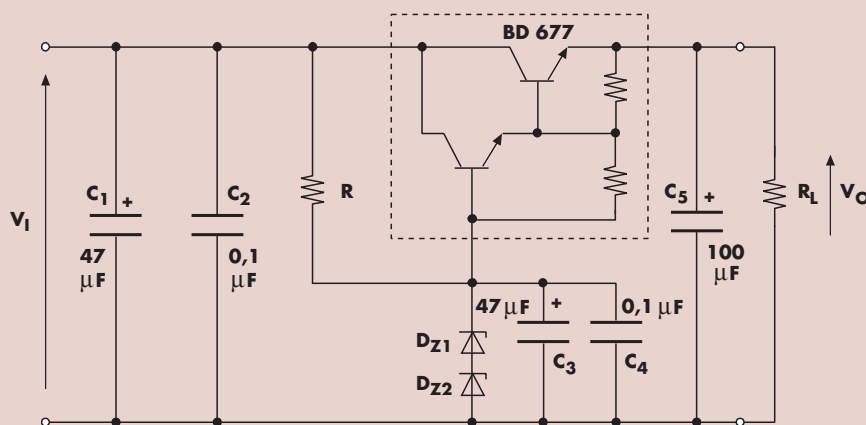
### Esempio

Dimensionare uno stabilizzatore lineare che fornisca una tensione di uscita di 12 V, 2 A disponendo di una tensione di ingresso di  $16 \text{ V} \pm 10\%$ . Si usi un Darlington integrato del tipo BD677 che presenta le seguenti caratteristiche:

$$\begin{aligned} V_{CEO \text{ MAX}} &= 60 \text{ V} & P_{tot \text{ MAX}} &= 40 \text{ W} \\ I_{C \text{ MAX}} &= 4 \text{ A} & h_{FE \text{ min}} &= 750 \end{aligned}$$

Come zener si sceglie il BZX 55/C9V1 che presenta una  $V_Z = 9,1 \text{ V}$  con in serie un BZX 55/C4V3 che presenta una  $V_Z = 4,3 \text{ V}$ ; infatti supposta la  $V_{BE}$  dei singoli BJT = 0,7 V si ottiene  $V_O = V_{Ztot} - 2 V_{BE} = 12 \text{ V}$ .

Il circuito risulta pertanto quello di **figura 3** (le capacità verranno giustificate più oltre). Si tenga anche presente che, poiché uno zener presenta il coefficiente di temperatura positivo e l'altro negativo, questa soluzione circuitale migliora la stabilizzazione termica, rispetto all'uso di un solo zener (il coefficiente di temperatura è negativo per  $V_Z < 5 \text{ V}$  e positivo per  $V_Z > 5 \text{ V}$ ).



**Figura 3** Circuito dell'esempio.

Come nel caso dei semplici alimentatori a resistenza e zener, la resistenza  $R$  viene dimensionata con la  $V_{Imin}$  e la  $I_{LMAX}$  e quindi, posto  $I_{Zmin} = 3$  mA, si ottiene:

$$R = \frac{V_{Imin} - V_{Ztot}}{I_{Zmin} + I_{LMAX}/h_{FEmin}} = \frac{14,4 - 13,4}{3 \cdot 10^{-3} + 2/750} =$$

$$= 176,5 \Omega \quad (\text{commerciale } 150 \Omega)$$

Il valore commerciale, scelto in difetto, garantisce a maggior ragione una corrente di zener sufficiente. Si calcola ora la  $I_{RMAX}$ :

$$I_{RMAX} = \frac{V_{IMAX} - V_{Ztot}}{R} = \frac{17,6 - 13,4}{150} = 28 \text{ mA}$$

La massima potenza dissipata dal resistore risulta:

$$P_{RMAX} = R \cdot I_{RMAX}^2 \approx 0,118 \text{ W}$$

Può quindi già bastare anche una resistenza da 1/4 W. La massima corrente nello zener risulta:

$$I_{ZMAX} = I_{RMAX} - I_{Bmin}$$

In mancanza di indicazioni si suppone la  $I_{Lmin} = 0$  e quindi anche  $I_{Bmin} = 0$  e risulta pertanto  $I_{ZMAX} = 28$  mA. La massima potenza dissipata dagli zener risulta quindi:

$$P_{Z1MAX} = V_{Z1} I_{ZMAX} \approx 0,255 \text{ W}$$

$$P_{Z2MAX} = V_{Z2} I_{ZMAX} \approx 0,120 \text{ W}$$

Considerando che ogni zener sopporta fino a 0,5 W il dimensionamento è corretto.

Il BJT presenta la massima dissipazione quando, con  $I_L$  massima, risulta massima anche la  $V_{CE}$ , quindi:

$$P_{DMAX} = I_{LMAX} \cdot V_{CEMAX} = I_{LMAX}(V_{IMAX} - V_O) =$$

$$= 2 \cdot (17,6 - 12) = 11,2 \text{ W}$$

Il valore trovato è nettamente nei limiti: per il dimensionamento termico si rinvia allo studio dei dispositivi di potenza.

La capacità  $C_1$  si rende necessaria per eliminare eventuali disturbi, qualora il collegamento al circuito raddrizzatore con filtro capacitivo risulti abbastanza lungo. La capacità  $C_2$  permette di filtrare le componenti armoniche più elevate del segnale raddrizzato residuo: i condensatori elettrolitici presentano normalmente una componente induttiva che riduce in alta frequenza l'effetto filtrante (si deve quindi usare un condensatore a bassa componente induttiva come, per esempio, un ceramico a disco).

Le capacità  $C_3$  e  $C_4$ , oltre a filtrare il rumore prodotto dallo zener (che è un'ottima sorgente di rumore bianco) smorzano eventuali variazioni residue della tensione di ingresso. Infine, la  $C_5$  agisce in modo che eventuali bruschi transitori della  $I_L$  non si ripercuotano sulla  $V_O$  (in altri termini, poiché il condensatore tende a mantenere costante la tensione ai suoi capi, agisce sopperendo, per un breve lasso di tempo, all'inevitabile ritardo di risposta del circuito regolatore).