

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).

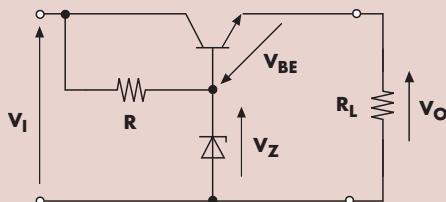


Figura 1 Regolatore di tipo serie a BJT.

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:

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

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_{VZ} il **coefficiente di temperatura dello zener**:

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

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

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

ovvero:

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

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

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} .

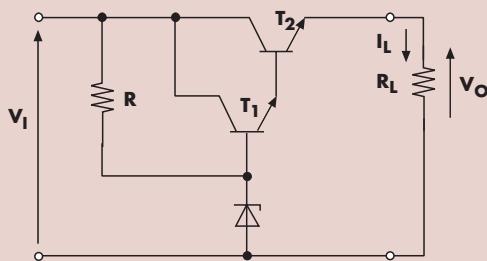


Figura 2 Regolatore di tipo serie con Darlington.

Esempio

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

$$V_{CEO\ MAX} = 60 \text{ V} \quad P_{tot\ MAX} = 40 \text{ W}$$

$$I_{C\ MAX} = 4 \text{ A} \quad h_{FE\ min} = 750$$

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 $V_Z > 5 \text{ V}$).

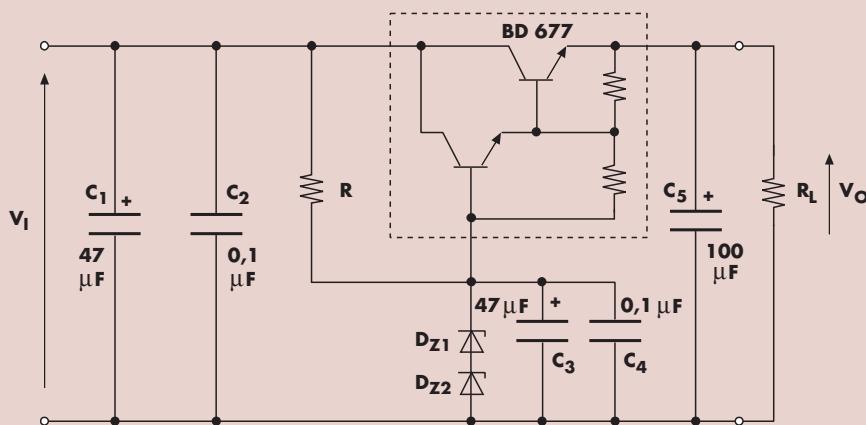


Figura 3 Circuito dell'esempio.

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 $I_{Zmin} = 3 \text{ mA}$, 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 $1/4 \text{ W}$. 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 $I_{ZMAX} = 28 \text{ mA}$. 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 $0,5 \text{ W}$ 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).