

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte sedici: Circuiti elettronici di base

A cura della Redazione

16.1 - Generalità

Le apparecchiature elettroniche comprendono essenzialmente quattro tipi di circuiti base: alimentatori, amplificatori, oscillatori e commutatori.

Le caratteristiche costruttive e funzionali di questi circuiti sono molteplici e dipendono sia dai componenti utilizzati che dalle applicazioni delle apparecchiature cui sono destinati.

Nella realizzazione delle apparecchiature elettroniche si usano essenzialmente quattro tipi di circuiti: alimentatori, amplificatori, oscillatori e commutatori.

Le caratteristiche costruttive e funzionali di questi circuiti possono essere molteplici e possono cambiare sensibilmente a seconda del tipo di applicazione e delle prestazioni dei componenti utilizzati; tra questi si trovano, naturalmente, i vari componenti a semiconduttore descritti nel Capitolo 15.

Poiché è praticamente impossibile fare una casistica delle applicazioni che si possono prevedere per i circuiti di cui sopra, nel seguito si cercherà di dare un'idea delle loro principali caratteristiche costruttive richiamando l'attenzione su quegli aspetti funzionali che ne condizionano le prestazioni.

I circuiti di seguito descritti si intendono costituiti, ai fini didattici, da componenti discreti opportunamente collegati tra loro; si fa però rilevare che, oggi, nella realizzazione dei dispositivi elettronici, è quasi esclusivamente utilizzata la tecnologia dei circuiti integrati di cui si parlerà più avanti.

16.2 - Alimentatori

Gli alimentatori sono apparecchi che forniscono tensioni continue da utilizzare per la polarizzazione di componenti elettronici attivi (diodi, transistori ecc.) o per fornire agli amplificatori la maggiore potenza del segnale di uscita rispetto a quello di ingresso. In genere, sono costituiti dai seguenti componenti: trasformatore, raddrizzatore, filtro e stabilizzatore.

In tutti gli apparati elettronici bisogna disporre di alimentazioni ausiliarie in corrente continua sia per la polarizzazione dei diversi componenti attivi che costituiscono gli apparati sia per assicurare agli amplificatori la maggior potenza del segnale di uscita rispetto a quello di ingresso.

Le alimentazioni ausiliarie in corrente continua possono essere fornite da pile, da batterie di accumulatori e, più frequentemente, da alimentatori.

In generale un alimentatore è costituito dai seguenti componenti (Figura 16.1):

- *trasformatore*, che ha il compito di isolare l'apparato dalla rete di alimentazioni e di fornire al secondario una tensione alternata di livello adeguato al valore della tensione continua che si desidera ottenere;
- *raddrizzatore*, che ha il compito di convertire la tensione alternata di alimentazione (tensione di entrata) in una tensione pulsante a valore medio non nullo (tensione di uscita);
- *filtro*, che ha il compito di spianare la tensione pulsante in uscita dal circuito raddrizzatore in modo da renderla, per quanto possibile, prossima alla tensione continua richiesta;
- *stabilizzatore*, che ha il compito di rendere la tensione continua di uscita praticamente insensibile alle oscillazioni della tensione di rete alle variazioni del carico alimentato.

Parametri tipici

I parametri tipici che caratterizzano gli alimentatori sono: le tensioni di ingresso e di uscita, la potenza massima erogabile, il fattore di ripple e il fattore di variazione.

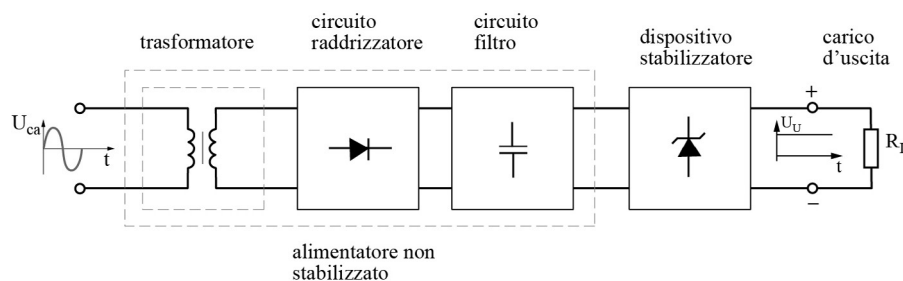


Figura 16.1 - Schema a blocchi di un alimentatore stabilizzato.

Il fattore di ripple è legato alla forma della tensione di uscita (Figura 16.2); poiché essa risulta costituita da una componente continua alla quale è sovrapposta una componente alternata (ripple), viene definito fattore di ripple (in percentuale) il seguente rapporto:

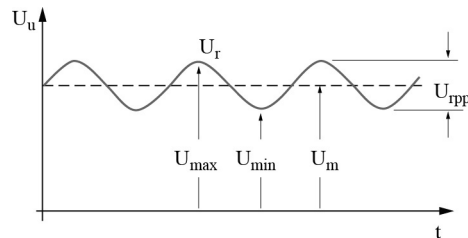


Figura 16.2 - Forma della tensione di uscita di un alimentatore.

$$F_r = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{um}} \cdot 100$$

dove:

U_{\max} e U_{\min} = valori massimo e minimo della tensione di uscita;

U_{um} = termine in corrente continua.

Il fattore di variazione F_v è legato invece alla caduta di tensione che si manifesta sul circuito di uscita del raddrizzatore nel passaggio dal funzionamento a vuoto a quello a carico. In particolare il fattore di variazione (in percentuale) relativo a una determinata condizione di carico è dato da:

$$F_v = \frac{U_{u0} - U_{ul}}{U_{ul}} \cdot 100$$

dove:

U_{u0} = tensione d'uscita a vuoto;

U_{ul} = tensione di uscita con il carico considerato.

Raddrizzatori

I raddrizzatori sono dispositivi capaci di convertire la tensione alternata di alimentazione in una tensione unidirezionale di tipo pulsante a valore medio non nullo. I raddrizzatori possono essere di tipo monofase o trifase: in entrambi i casi si hanno soluzioni circuitali che permettono di raddrizzare una a entrambe le semionde.

I circuiti raddrizzato d possono suddividere in due gruppi:

- monofasi, nei quali l'alimentazione alternata di alimentazione è di tipo monofase (tipicamente 220 V, 50 Hz):

- trifasi, nei quali l'alimentazione viene effettuata con una terna simmetrica di tensioni (tipicamente 380 V, 50 Hz).

I circuiti raddrizzatori monofasi e trifasi possono essere, a loro volta, di due tipi: a una semionda e a doppia semionda.

Nella tabella 16.1 sono riportati gli schemi, la forma d'onda delle tensioni in uscita e il valore della tensione media e della tensione inversa richiesta ai diodi. Per semplicità si sono considerati diodi ideali trascurando la tensione di soglia dei dispositivi.

Lo schema 1 è relativo a un circuito raddrizzatore monofase a una semionda.

I circuiti raddrizzatori monofase a doppia semionda possono essere a ponte centrale e a ponte di Graetz.

Il circuito a presa centrale (schema 2) comprende un trasformatore che presenta l'avvolgimento secondario suddiviso in due parti identiche capaci ciascuna di rendere disponibile una tensione alternata di valore

$$U_1 = 1,1 U_{um}$$

Osservando lo schema 2 si può rilevare che durante la semionda positiva della tensione è polarizzato il diodo D_1 , e quindi la corrente I_u che percorre il carico R_L , corrisponde a quella I_{D1} , che attraversa tale diodo.

Durante la semionda negativa risulta invece polarizzato il diodo D_2 per cui la corrente I_u che attraversa il carico R_L è dovuta alla corrente I_{D2} che attraversa il diodo D_2 e presenta sempre lo stesso senso.

Nello schema 3 è invece rappresentato un circuito raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz nel quale si trovano disposti sui due rami in parallelo e collegati in controfase, quattro diodi.

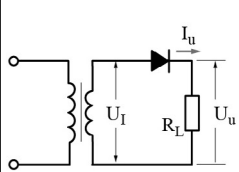
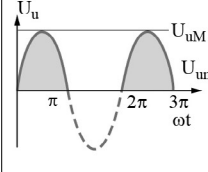
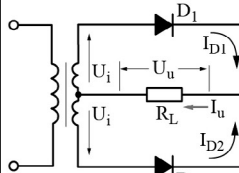
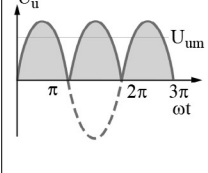
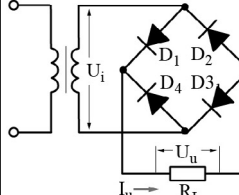
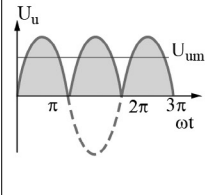
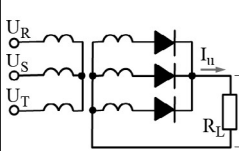
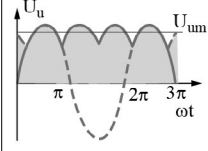
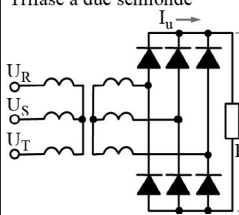
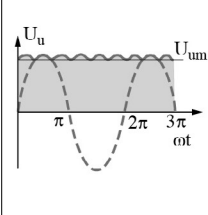
Durante la semionda positiva risultano in conduzione i diodi D_1 e D_3 mentre sono polarizzati negativamente e quindi in blocco i diodi D_2 e D_4 viceversa, durante la semionda negativa, risultano in conduzione i diodi D_2 e D_4 e in interdizione i diodi D_1 e D_3 .

Il senso della corrente I_u nella resistenza di carico R_L risulta il medesimo per entrambe le semionde della tensione di alimentazione analogamente a quanto già visto per il raddrizzatore a presa centrale.

I circuiti raddrizzatori trifasi sono realizzati secondo gli schemi 4 e 5 dai quali si rileva che, in entrambe le configurazioni, l'alimentazione del circuito viene effettuata tramite un sistema di tensioni trifase.

Nello schema 4 la tensione di uscita U_u è prelevata tra il punto comune dei tre diodi e il neutro del trasformatore, mentre nello schema 5 viene prelevata tra i punti comuni delle due terne di diodi.

Tabella 16.1 – Schemi e forme d'onda della tensione d'uscita di circuiti raddrizzatori.

No.	Schema	Onda di tensione	Valore medio della tensione in uscita	Tensione inversa sul diodo
1	<p>A una semionda</p> 		$U_{um} = \frac{U_{uM}}{\pi} = 0,318 U_{uM}$	$U_i = U_{uM}$
2	<p>A doppia semionda</p> 		$U_{um} = \frac{U_{uM}}{\pi/2} = 0,636 U_{uM}$	$U_i = 2U_{uM}$
3	<p>A ponte di Graetz</p> 		$U_{um} = \frac{U_{uM}}{\pi/2} = 0,636 U_{uM}$	$U_i = U_{uM}$
4	<p>Trifase ad una semionda</p> 		$U_{um} = 0,83 U_{uM}$	$U_i = \sqrt{3}U_{uM}$
5	<p>Trifase a due semionde</p> 		$U_{um} = 0,95 U_{uM}$	$U_i = \sqrt{3}U_{uM}$

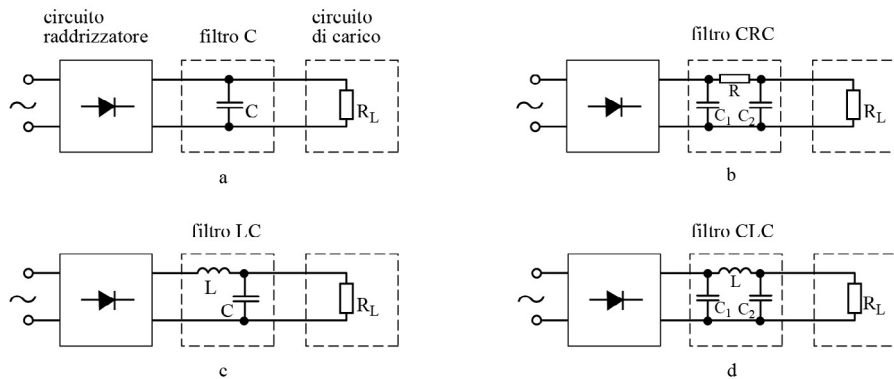


Figura 16.3 – Esempi di circuiti filtro impiegati negli alimentatori.

Filtri

I filtri sono dispositivi normalmente costituiti da elementi passivi, quali condensatori, induttanze e resistenze, che vengono utilizzati negli alimentatori per ridurre l'ampiezza del ripple della tensione di uscita dai raddrizzatori.

Come si è visto la tensione di uscita di un circuito raddrizzatore ha un andamento ondulatorio e ciò può comportare un funzionamento insoddisfacente del carico alimentato; detta tensione deve essere pertanto spianata (resa il più possibile costante) e ciò viene fatto mediante uno speciale circuito, denominato filtro, collegato all'uscita del raddrizzatore.

I circuiti filtro possono essere di tipo attivo, se realizzati con diodi, transistori, amplificatori, oppure di tipo passivo se ottenuti con resistenze, induttanze e capacità.

Questi ultimi, che sono di progettazione più semplice e di impiego largamente diffuso, si possono suddividere in quattro categorie:

- filtro capacitivo semplice (Figura 16.3a);
- filtro CRC, costituito da un filtro capacitivo semplice e da una rete RC (Figura 16.3b);
- filtro induttivo (Figura 16.3c);
- filtro a π (Figura 16.3d).

La scelta del circuito filtro dipende dalle esigenze del carico da alimentare; in particolare tale scelta deve essere attuata in modo da contenere al massimo la tensione di ripple.

La tensione ai capi di R_L tende quindi ad assumere un valore costante compreso tra quello medio U_{um} e quello massimo U_{uM} a seconda delle caratteristiche dei vari componenti.

È facile comprendere che una riduzione del ripple è possibile aumentando (a parità di carico R_L) il valore della capacità, tuttavia ciò può comportare picchi di corrente eccessivi durante le fasi di carica del condensatore; da qui la necessità di scegliere diodi in grado di sopportare correnti elevate.

Nel dimensionamento del circuito si deve quindi studiare con cura il comportamento del filtro al variare del carico al fine di individuare il legame da stabilire il valore del ripple e la capacità dei condensatore.

Stabilizzatore

Gli stabilizzatori sono dispositivi che vengono usati negli alimentatori per mantenere sufficientemente costante la tensione di uscita sia ai variare della tensione alternata di alimentazione che della corrente di carico erogata.

Gli alimentatori con filtro di uscita (Figura 16.4a) possono essere considerati dei generatori che presentano una certa resistenza interna per cui è possibile schematizzarli con il circuito equivalente di figura 16.4b.

Ne consegue che, al variare della corrente erogata, la tensione ai capi del carico R_L , segue l'andamento riportato in figura 16.4c.

Per mantenere le variazioni della tensione di uscita entro un certo valore è necessario disporre di un dispositivo (stabilizzatore) che modifichi il comportamento dell'alimentatore in modo da contenere tali variazioni entro il suddetto limite.

Il più semplice degli stabilizzatori della tensione di uscita degli alimentatori è il

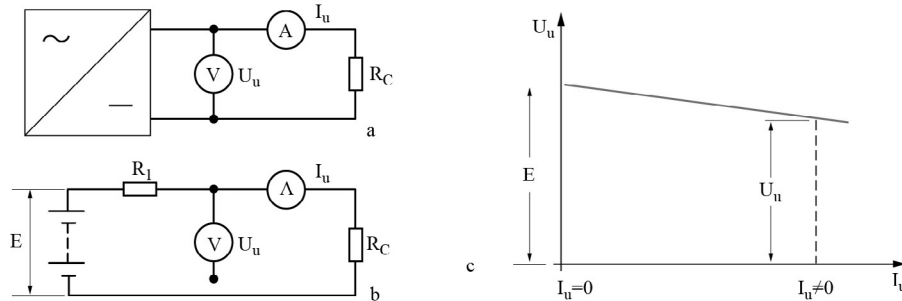


Figura 16.4 – Stabilizzazione della tensione di uscita di un alimentatore.

- a – schema dell'alimentatore;
- b – schema equivalente dell'alimentatore;
- c – andamento della tensione di uscita.

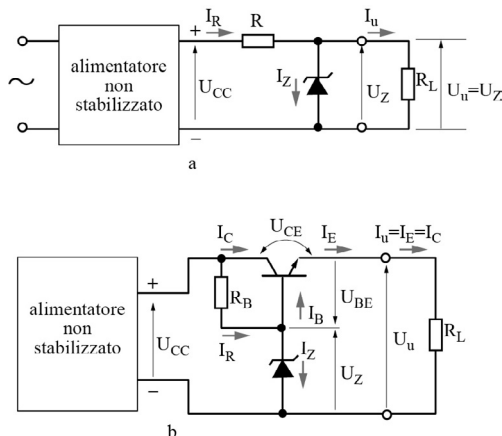


Figura 16.5 - Circuito stabilizzatore per alimentatori.
a - con diodo Zener;
b - con transistore e diodo Zener di riferimento.

circuito a diodo Zener già descritto al paragrafo 15.2 del Capitolo 15. In figura 16.5a riportato lo schema relativo alla applicazione che si sta descrivendo. In particolare il diodo deve essere scelto con una tensione U_Z uguale alla tensione U_u che si vuole mantenere costante ai capi del carico.

Questo metodo è adatto per alimentatori di piccola potenza (qualche watt).

Un altro metodo, molto più usato del precedente, per stabilizzare la tensione di uscita di un alimentatore si basa sull'impiego di un transistor, collegato in serie al carico R_L (Figura 16.5b) e di un diodo Zener che ha il compito di originare la tensione di riferimento U_Z .

Applicando il 2° principio di Kirchhoff alla maglia di uscita, si può scrivere:

$$U_u = U_Z - U_{BE} = U_{CC} - U_{CE}$$

Poiché U_Z è costante, in quanto tensione ai capi di un diodo Zener, una diminuzione (o aumento) di U_{CC} provoca un incremento (decremento) della conducibilità del transistor ovvero una diminuzione (aumento) della resistenza tra collettore ed emettitore riportando automaticamente la tensione U_u al livello desiderato.

Viceversa ad un aumento (o diminuzione) della resistenza di carico R_L e quindi di U_u , corrisponde una diminuzione (aumento) di I_u e quindi di I_C . Ciò si traduce una riduzione (aumento) di I_B e di conseguenza ad una riduzione (aumento) della conduzione del transistor che ristabilisce il valore di U_u .

Alimentatori stabilizzati così concepiti presentano limiti di potenza che dipendono dalle caratteristiche del transistor e non da quelle del diodo Zener.

16.3 - Amplificatori

Gli amplificatori sono dispositivi capaci di aumentare l'ampiezza di un segnale elettrico comunque variabile mantenendone la forma praticamente inalterata.

Con il termine amplificazione s'intende l'insieme dei trattamenti a cui viene sottoposto un segnale elettrico al fine di aumentarne l'ampiezza senza modificarne la forma.

Le apparecchiature elettroniche che vengono utilizzate per raggiungere lo scopo suddetto si dicono amplificatori.

I componenti fondamentali degli amplificatori sono i transistori, ad effetto di campo (*FET* e *MO-SFET*) o di tipo bipolare (*BJT*), nelle varie forme costruttive viste al Capitolo 15.

Per facilitare la comprensione del principio di funzionamento degli amplificatori si possono prendere in considerazione i diagrammi di amplificazione ottenibili con apparecchi realizzati con un solo transistor di tipo *FET* o di tipo *BJT*.

Si consideri il circuito di figura 16.6a nel quale è presente un transistor *n-FET* e si immagini che, in base alle caratteristiche del circuito di polarizzazione (in corrente continua), la retta di carico e quindi il punto di lavoro P siano quelli indicati nella figura 16.6b, cui corrispondono i seguenti valori di tensione e corrente: $U_{DSO} = 10 \text{ V}$, $U_{GSO} = 1,5 \text{ V}$, $I_{DO} = 2,5 \text{ mA}$.

Se si applica ora all'ingresso una tensione variabile u_i ad esempio sinusoidale, di valore tra picco e picco di 1 V, il punto di lavoro si sposterà sulla retta di carico oscillando tra $U_{GS} = 1 \text{ V}$ e $U_{GS} = 2 \text{ V}$.

Lo spostamento del punto di lavoro sulla retta di carico si riflette automaticamente sulla corrente I_D e sulla tensione U_{DS} e in definitiva sulla tensione d'uscita U_u che varierà secondo lo stesso andamento della tensione d'ingresso U_i .

L'effetto di amplificazione può essere dedotto dall'esame delle ampiezze dei vari segnali in gioco; in particolare, l'applicazione all'ingresso di un segnale variabile di valore tra picco e picco di 1 V, porta la corrente I_D a variare tra 1,5 e 3,5 mA, mentre la tensione ai capi del *FET* e quindi la tensione d'uscita oscilla tra 6 e 14 V.

Si osservi che la tensione di uscita è ancora sinusoidale e che risulta sfasata di 180° in anticipo rispetto a quella di ingresso.

Quanto sopra descritto si applica anche ai transistori *MOSFET* che, come i *FET*, non assorbono corrente all'ingresso (per questi motivi i transistori suddetti si dicono pilotati in tensione).

Per ciò che riguarda il funzionamento di un amplificatore realizzato con un transistor bipolare (*BJT*) (Figura 16.7a), si può fare riferimento alla figura 16.7b nella quale, come già visto per il transistor *FET*, è riportata una retta di carico che interseca le caratteristiche voltamperometriche nella zona lineare.

Poiché il *BJT*, a differenza del *FET*, è pilotato in corrente, se alla corrente di ingresso di $25 \mu\text{A}$ se ne sovrappone una sinusoidale con ampiezza picco-picco di $10 \mu\text{A}$, la corrente di collettore varierà tra 3 e 5 mA, mentre la caduta di tensione ai capi del *BJT* (tensione di uscita) varierà tra 5,8 e 8,2 V.

Si osservi che mentre la corrente di collettore ha la stessa fase della corrente d'ingresso, la tensione di uscita è sfasata, rispetto ad essa, di 180° .

I principali parametri che caratterizzano un amplificatore sono il guadagno, le risposte in frequenza e fase e il rapporto segnale-rumore.

Il significato di guadagno di amplificazione è già stato visto al paragrafo 15.4 del

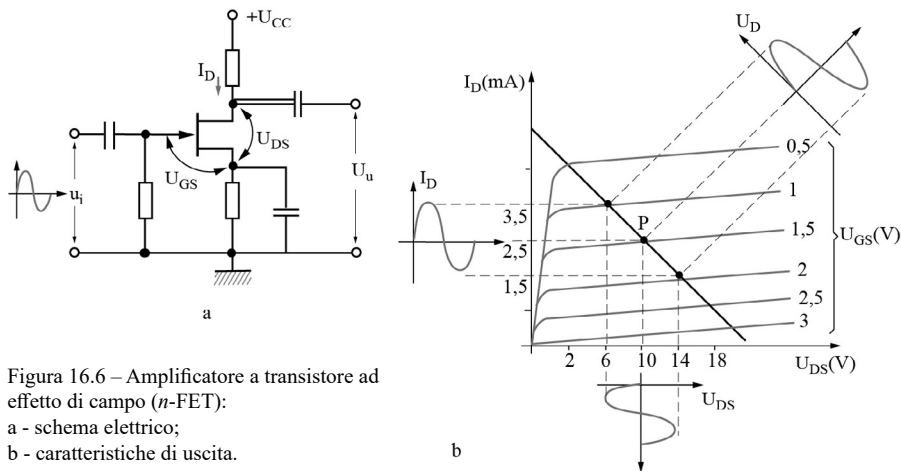


Figura 16.6 – Amplificatore a transistor ad effetto di campo (*n-FET*):
a - schema elettrico;
b - caratteristiche di uscita.

Capitolo 15, c'è però da aggiungere che il guadagno viene normalmente espresso in una unità di misura logaritmica a base decimale denominata decibel (dB). In particolare, i guadagni di tensione A_v e di corrente A_i del generico quadripolo di cui al paragrafo sopracitato rispondono alle relazioni:

$$A_{v(\text{dB})} = 20 \cdot \log \frac{U_u}{U_i} \qquad A_{i(\text{dB})} = 20 \cdot \log \frac{I_u}{I_i}$$

mentre il guadagno di potenza A_p è dato da:

$$A_{p(\text{dB})} = 10 \cdot \log \frac{P_u}{P_i}$$

dove: U_u, I_u, P_u e U_i, I_i, P_i sono rispettivamente le grandezze che caratterizzano i segnali di uscita e di ingresso del quadripolo (amplificatore).

Figura 16.7 - Amplificatore a transistore di tipo bipolare (npn-BJT):
a - schema elettrico;
b - caratteristiche di uscita.

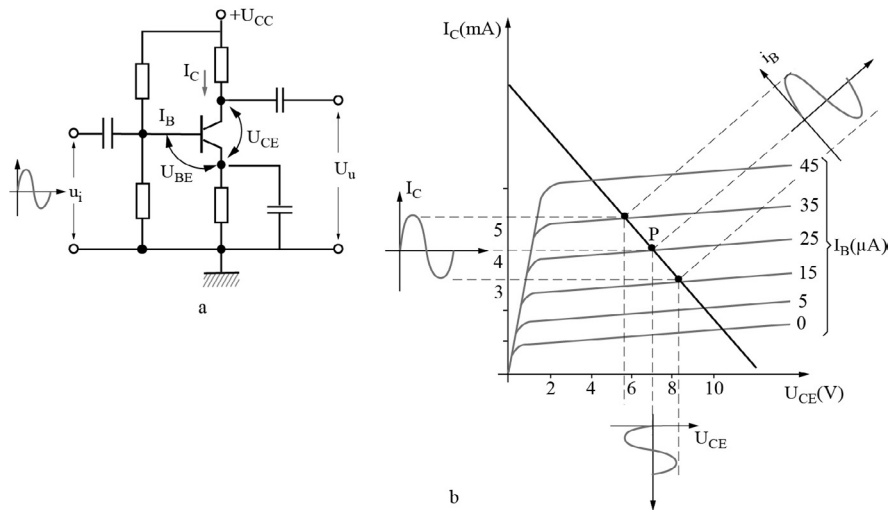


Tabella 16.2 – Corrispondenza tra alcuni valori del guadagno espressa in dB ed i rispettivi rapporti tra tensioni, correnti e potenze.

Guadagno (dB)	$U_u/U_t - I_u/I_t$	P_u/P_t	Guadagno (dB)	$U_u/U_t - I_u/I_t$	P_u/P_t
0	1,00	1,00	10	3,16	10^2
0,1	1,01	1,02	20	10	10^2
0,5	1,06	1,12	30	31,6	10^2
1	1,12	1,26	40	102	10^2
5	1,78	3,16	50	10^2	10^5

Nella tabella 16.2 sono riportati, per alcuni valori di guadagno espressi in decibel, i valori dei rapporti tra le grandezze di uscita e di ingresso.

Si noti che una amplificazione corrisponde ad un numero positivo (+dB), mentre una attenuazione è indicata da un numero negativo (- dB).

Per risposta in frequenza di un amplificatore s'intende l'andamento del guadagno, dell'amplificatore in funzione della frequenza del segnale d'ingresso. Poiché il guadagno può variare con la frequenza, si definisce come ampiezza di banda di un amplificatore l'intervallo di frequenza entro il quale il segnale di uscita (corrente o tensione) risulta almeno pari al 90% circa (- 1 dB) di quello massimo ottenibile.

Per risposta in fase di un amplificatore s'intende invece l'andamento dello sfasamento del segnale di uscita rispetto a quello di ingresso in funzione della frequenza di quest'ultimo.

Il rapporto segnale/rumore rappresenta l'indice dei disturbi presenti nel segnale fornito da un amplificatore a causa di tensioni indesiderate generate da sorgenti esterne o da componenti dell'amplificatore stesso.

La classificazione degli amplificatori risulta molto difficile viste le numerose possibilità di realizzazione e di applicazione di questi importantissimi dispositivi elettronici. Nel seguito si danno quindi solo alcuni cenni sulle soluzioni costruttive più significative evidenziando quegli aspetti che ne caratterizzano il funzionamento.

Amplificatori reazionati

Un amplificatore reazionato è un amplificatore che prevede una reazione tra segnali di uscita e di entrata.

Il valore del guadagno degli amplificatori dipende dalle caratteristiche dei transistori che risultano però notevolmente variabili con la produzione. Inoltre sul comportamento dei transistori influiscono in modo sensibile la temperatura e le tensioni in gioco.

Al fine di rendere il guadagno per quanto possibile indipendente dai parametri sopracitati, si ricorre ad artifici circuitali introducendo alcuni componenti passivi (resistori, condensatori, dispositivi misti ecc.), le cui caratteristiche sono più stabili, tramite i quali si riporta all'ingresso dell'amplificatore una parte del segnale in uscita in modo che si combini opportunamente con il segnale d'ingresso stesso.

Negli amplificatori retroazionati (Figura 16.8) il sistema *A* viene denominato blocco di andata, quello *B* è detto blocco di ritorno o di retroazione e il punto *C* nodo di ingresso. Dato che nel nodo *C* avviene la somma vettoriale dei segnali di ingresso E_s e di retroazione E_r , si può verificare che detti segnali siano in fase o in opposizione di fase; nel primo caso l'amplificatore si dirà funzionante con retroazione positiva, mentre nel secondo caso l'amplificatore si dirà funzionante con retroazione negativa. In generale negli amplificatori si utilizza la retroazione negativa in quanto consente di mantenere il guadagno costante anche se ne riduce il valore.

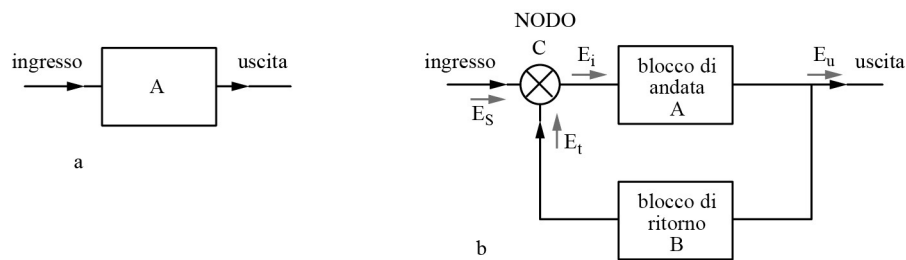


Figura 16.8 - Schematizzazione di un amplificatore non reazionato (a) e reazionato (b).

Si consideri a titolo di esempio il caso di un amplificatore con reazione ottenuta con resistenza come schematizzato nella figura 16.9.

Per comprendere l'effetto della reazione si può supporre di operare con un amplificatore ideale caratterizzato da guadagno tanto elevato da poter essere considerato infinito e da impedenza tra i morsetti *A* e *B* (ingresso) molto più elevata dei valori R_i (resistenza di ingresso) e di R_r (resistenza di reazione).

Ciò significa che si può supporre praticamente nulla tensione tra i punti *A* e *B*.

Valgono pertanto le seguenti relazioni:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_r = \frac{U_r}{R_r}$$

ma essendo anche $I_i = -I_r$, si ottiene:

$$\frac{U_i}{R_i} = -\frac{U_u}{R_r}$$

dalla quale si può esprimere il guadagno A_v :

$$A_v = \frac{U_u}{U_i} = -\frac{R_r}{R_i}$$

Si è quindi giunti ad una importantissima conclusione e cioè che il guadagno di un amplificatore reazionato con resistenza è uguale al rapporto tra la resistenza di reazione e quella di ingresso, cambiato di segno.

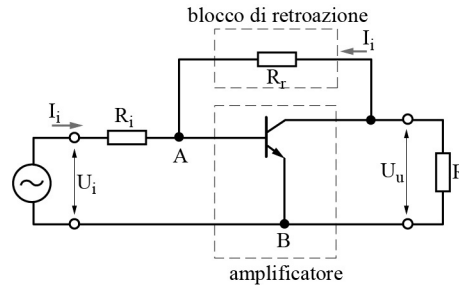


Figura 16.9 - Amplificatore con retroazione di tipo resistivo.

La costanza del guadagno viene quindi fatta dipendere dalla costanza dei valori di R_r e R_i che può essere più facilmente conseguita che non la costanza delle caratteristiche dell'amplificatore originale. Ciò va notevolmente a scapito del valore massimo conseguibile del guadagno che risulta ridotto, ma questo non costituisce, in genere un problema in quanto è possibile ottenere guadagni in tensione fino ai 10^6 .

Vi è infine da osservare che nella ultima formula scritta il segno «—» sta ad indicare che la tensione in uscita è in opposizione di fase rispetto a quella d'entrata.

Amplificatori di potenza

Un amplificatore si dice di potenza quando è capace di erogare nel circuito di uscita potenze relativamente elevate.

Gli amplificatori di potenza possono funzionare operando l'amplificazione durante tutto o parte del periodo del segnale di ingresso e sono generalmente posti al termine di una catena di amplificatori.

Si ricorre agli amplificatori di potenza tutte le volte che il carico è costituito da un utilizzatore (ad esempio un altoparlante) il quale, per funzionare correttamente, deve essere alimentato mediante una potenza dell'ordine delle decine o centinaia di watt. Gli amplificatori di potenza costituiscono solitamente lo stadio finale di un'apparecchiatura i cui primi stadi sono costituiti da amplificatori per piccoli segnali.

Nella figura 16.10 è riportato lo schema di principio di un tipico amplificatore di potenza. La configurazione proposta, detta a push-pull, prevede l'impiego di due transistori uno *npn* e l'altro *pnp* e due alimentazioni ausiliarie.

In questa configurazione entrambi i transistori T_1 e T_2 a riposo sono in stato di interdizione e il potenziale comune del loro emettitore è nullo e quindi nel carico R_L non circola alcuna corrente.

Applicando all'ingresso dei due transistori un segnale sinusoidale, durante la semionda positiva conduce T_1 mentre durante quella negativa conduce T_2 . Poiché i transistori hanno in comune il carico R_L , nel carico stesso viene ricostruita la forma d'onda completa U_u .

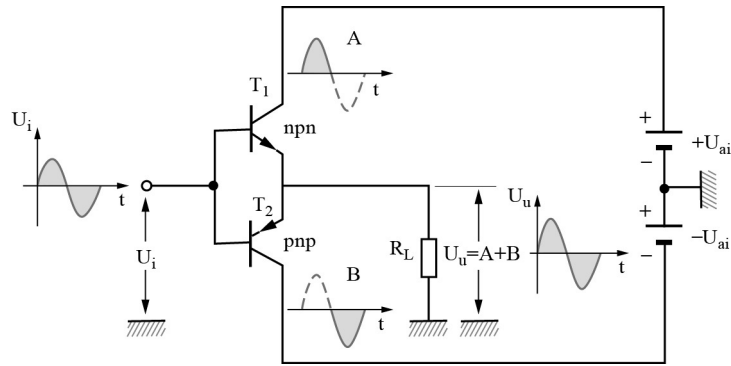


Figura 16.10 – Schema di principio di un amplificatore di potenza tipo push-pull.

16.4 - Oscillatori

*Gli oscillatori sono dispositivi in grado di generare segnali di forma sinusoidale ad una determinata frequenza.
Sono costituiti da un circuito oscillante accoppiato ad un amplificatore con retroazione positiva.*

Un oscillatore è costituito, in prima approssimazione, da un circuito oscillante e da un amplificatore il cui segnale di uscita viene riportato in parte all'ingresso in retroazione positiva (segnale di ingresso e di retroazione si sommano).

Per ottenere la frequenza di oscillazione desiderata, cioè quella per la quale l'amplificatore si autoeccita, si fa ricorso a circuiti capaci di entrare in risonanza ad una determinata frequenza. Le soluzioni possibili sono diverse e nel seguito si ricorderanno solo le più significative.

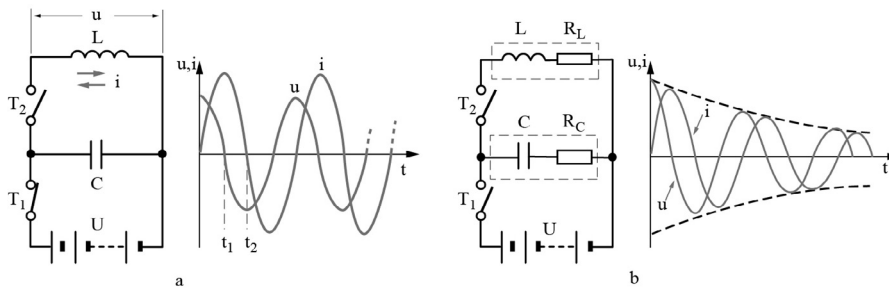


Figura 16.11 – Schemi di principio e andamenti della tensione e della corrente di un oscillatore LC:

a – circuito ideale; b - circuito reale.

Oscillatori LC

Gli oscillatori LC hanno il circuito oscillante costituito da una rete di induttanze e di capacità che risuonano alla frequenza prescelta.

I componenti di base di un oscillatore LC sono un circuito risonante, appunto un'induttanza e un condensatore e un amplificatore.

Supposto che i due elementi passivi siano senza perdite, si dimostra facilmente che nel caso in cui il condensatore fosse caricato con una certa energia elettrostatica $W_c = 1/2 \cdot C \cdot U^2$ e venisse chiuso sull'induttanza L , tra i due elementi del circuito si avvierebbe un processo di carica e scarica che continuerebbe indefinitamente, mentre ai capi del circuito LC risulterebbe presente una tensione $u = U_M \sin \omega t$ di forma sinusoidale con valore di cresta costante (Figura 16.10a).

La frequenza di oscillazione f_r del circuito LC dipende dai valori della capacità del condensatore C e dell'induttanza L secondo la relazione:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

e corrisponde alla frequenza di risonanza del circuito.

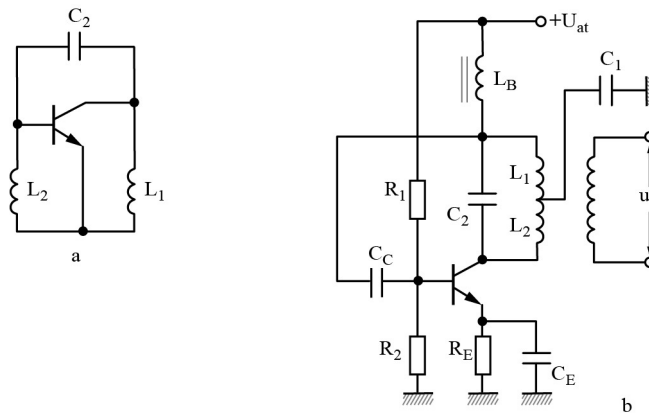


Figura 16.12 – Oscillatore di Hartley:
a – schema di principio;
b – esempio di realizzazione pratica.

In realtà qualsiasi circuito reale LC presenta delle resistenze che dissipano parte dell'energia disponibile per cui la tensione ai capi del medesimo decresce e risulta, di tipo oscillatorio smorzato (Figura 16.11b).

Con l'impiego di un amplificatore con retroazione positiva non si fa altro che compensare le perdite suddette in modo da rendere il circuito reale LC un vero e proprio oscillatore.

Una soluzione costruttiva classica è rappresentata dall'oscillatore di Hartley, realizzato mediante un transistor bipolare, due induttanze e un condensatore (Figura 16.12).

Per ottenere la frequenza di oscillazione desiderata bisogna fare in modo che il circuito parallelo costituito dalle due induttanze e dalla capacità suoni al valore di frequenza prescelto. In particolare, la reattanza induttiva complessiva dovrà risultare uguale alla reattanza capacitiva:

$$\omega_r(L_1 + L_2) = \frac{1}{\omega \cdot C_2}$$

da cui:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2) \cdot C_2}}$$

Gli oscillatori LC sono adatti per fornire segnali di tensione con frequenza di oscillazione da qualche centinaio di kilohertz a qualche megahertz.

Oscillatori al quarzo

Gli oscillatori al quarzo hanno il circuito oscillante costituito da un cristallo di quarzo con frequenza propria di risonanza uguale a quella prescelta.

I quarzi sono caratterizzati da una elevata stabilità della frequenza propria di risonanza.

Un oscillatore al quarzo si differenzia da quelli visti in precedenza per il fatto che il circuito oscillante è costituito da un cristallo di quarzo.

La proprietà fondamentale del quarzo è quella di generare una d.d.p. se sottoposto a sollecitazioni meccaniche come pure di subire delle deformazioni meccaniche sotto

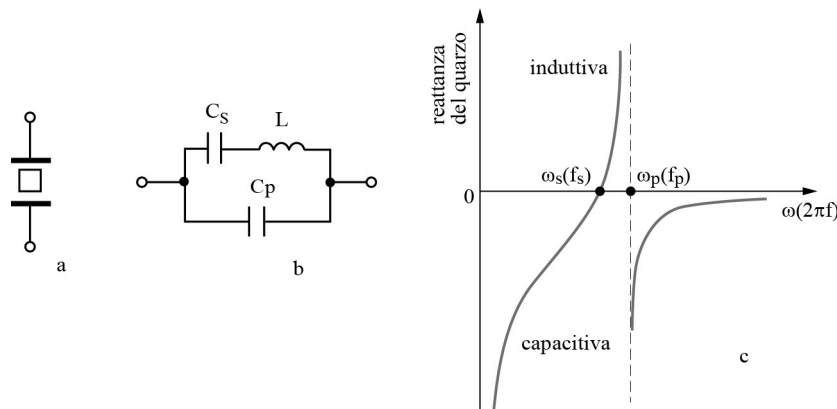


Figura 16.13 - Oscillatori al quarzo:
a - simbolo elettrico;
b - circuito equivalente;
c - andamento della reattanza in funzione della frequenza.

l'effetto di un campo elettrico, deformazioni che risultano oscillatorie se il campo è di tipo alternato (effetto piezoelettrico).

La deformazione piezoelettrica assume il valore massimo quando la frequenza della tensione applicata corrisponde alla frequenza di risonanza propria del cristallo. Poiché questa dipende dal modo in cui il quarzo viene tagliato, sono disponibili dispositivi con frequenza di oscillazione propria sino a parecchi megahertz.

Un cristallo di quarzo, il cui simbolo elettrico è rappresentato in figura 16.13a si comporta in pratica come il circuito elettrico equivalente riportato in figura 16.13b.

In figura 16.13c è riportato l'andamento della reattanza del quarzo in funzione della pulsazione ω : si può notare la presenza di una pulsazione di risonanza serie, che si manifesta quando le reattanze dovute a L e a C_s si eguagliano e una pulsazione di risonanza parallelo che si manifesta quando la reattanza complessiva del ramo serie (L, C_s) eguaglia quella della capacità C_p .

Il quarzo può essere inserito in un oscillatore in molti modi (Figura 16.14) e riesce a conferire alla frequenza di oscillazione dell'apparecchio un elevato grado di stabilità.

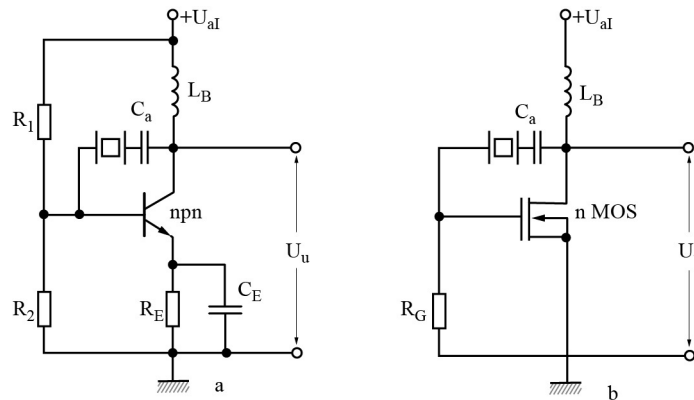


Figura 16.14 - Esempi realizzativi di oscillatori al quarzo:
a - con transistore *npn*; b - con transistore *n*-MOS.

16.5 - Commutatori

I commutatori sono dispositivi elettronici in grado di generare segnali di forma non sinusoidale, ad esempio quadrata, da utilizzare per il comando di circuiti logici.

In questo paragrafo si esaminano alcuni dispositivi elettronici capaci di generare segnali di forma non sinusoidale (quadrata, impulsiva ecc.) adatti al comando di circuiti logici (vedere Capitolo 17).

Questi segnali sono spesso a due livelli e le condizioni di funzionamento dei circuiti per i quali vengono generati impongono che il passaggio dall'uno all'altro livello avvenga in tempi trascurabili rispetto a quello di permanenza al livello medesimo. Per questo motivo i componenti attivi che vengono utilizzati nella costruzione di questi dispositivi non funzionano nella zona lineare, ma operano nelle zone di interdizione e di saturazione passando dall'uno all'altra in tempi brevissimi.

Questi componenti presentano pertanto, in funzionamento impulsivo, tempi di inserzione e di spegnimento, detti tempi di commutazione, che assumono un'importanza fondamentale in tutte le applicazioni circuitali per le quali è necessaria una risposta rapida e fedele.

Interruttori elettronici

Gli interruttori elettronici sono commutatori costituiti da un transistore che viene fatto funzionare alternativamente nelle zone di interdizione e di saturazione passando dall'una all'altra in tempi dell'ordine delle decine di nanosecondi.

Per queste applicazioni vengono usati sia transistori di tipo bipolare che ad effetto di campo.

Si consideri, ad esempio, il circuito di figura 16.15a nel quale è raffigurato un transistore *npn* alimentato con una tensione U_{cc} . Se l'interruttore T è aperto il punto di lavoro del transistore è individuato, sulle caratteristiche di uscita, dalla lettera A (Figura 16.15b) in corrispondenza, cioè, del punto di incontro della retta di carico relativa al circuito in esame e la caratteristica $I_B = 0$. In queste condizioni le correnti di collettore I_C e quelle di base I_B sono praticamente nulle, ai capi del transistore è presente tutta la tensione di alimentazione U_{cc} e il transistore può essere pensato come un interruttore aperto.

Se ora, chiudendo T , si applica al circuito di base dei transistore una tensione capace di far circo-

lare una corrente I_B pari a quella che delimita la zona di funzionamento lineare da quella di saturazione, il punto di lavoro del transistore passa istantaneamente da A a B . In tale condizione la corrente I_B è limitata, in pratica, solo da R_c , il transistore si dice saturo e si comporta praticamente come un interruttore chiuso.

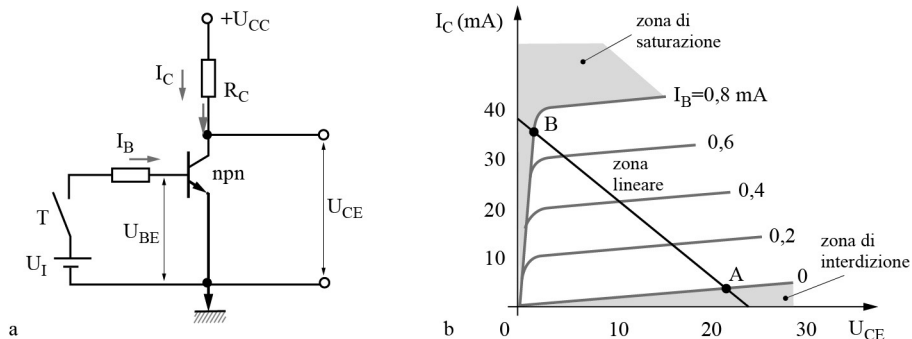


Figura 16.15- Schema di principio di un transistore utilizzato come interruttore (a) e caratteristiche di uscita (b).

Aprendo T il punto di lavoro ritorna in A e il transistore riassume la condizione di interdizione (interruttore aperto).

Nella figura 16.16 è riportato l'andamento delle varie grandezze interessate dal funzionamento descritto. Come si può rilevare la commutazione del transistore non viene istantaneamente, ma dopo un certo tempo definito; con particolari soluzioni circuitali i tempi di salita e di discesa possono essere contenuti entro qualche decina di nano secondi.

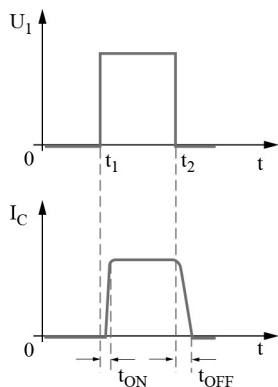


Figura 16.16 - Andamento delle grandezze di un interruttore elettronico:
a - impulso di comando (t_1 , t_2 = istanti di chiusura e apertura interruttore);
b - forma d'onda della corrente di carico (t_{on} , t_{off} tempi occorrenti al transistore per portarsi in saturazione e in interdizione).

Un comportamento del tutto analogo a quello descritto si può ottenere anche dai transistori a effetto di campo.

Multivibratori

I multivibratori sono commutatori costituiti da due amplificatori che vengono fatti funzionare alternativamente nelle zone di saturazione e di interdizione. I multivibratori possono essere di tipo astabile, monostabile e bistabile a seconda delle modalità con le quali ciascun transistore attua la commutazione dallo stato di interdizione a quello di saturazione.

Con il termine multivibratore s'intende un dispositivo costituito essenzialmente da due amplificatori accoppiati fra loro e funzionanti, alternativamente, l'uno in saturazione l'altro in interdizione.

I multivibratori generano impulsi di forma rettangolare e a seconda delle modalità di saturazione, si possono suddividere in tre categorie:

- *astabili*, se non presentano alcuna condizione stabile di funzionamento in quanto la commutazione avviene con continuità e in maniera automatica senza la necessità di segnali di eccitazione;

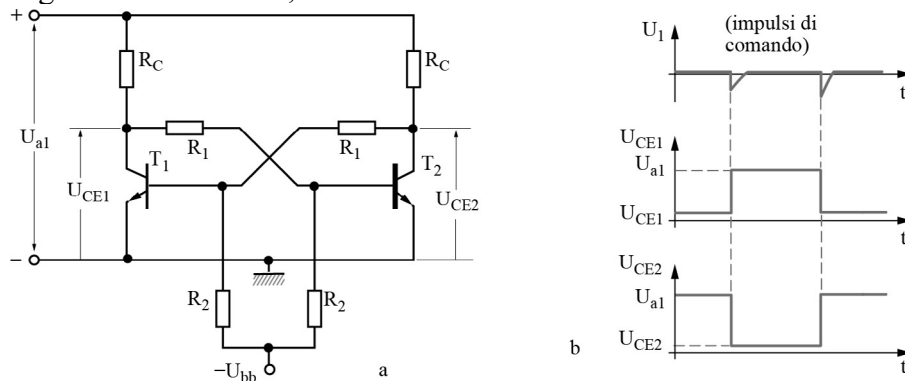


Figura 16.17 - Schema di principio di un multivibratore bistabile (a) e forme dei segnali rilevabili sui collettori del transistor (b).

- *monostabili*, se presentano una sola condizione stabile di funzionamento; passaggio dalla condizione stabile a quella instabile avviene solo in corrispondenza di impulsi dall'esterno per poi riportarsi automaticamente nella condizione stabile iniziale;
- *bistabili*, se presentano due condizioni stabili di funzionamento; il passaggio dall'una all'altra condizione avviene ogni qual volta viene inviato un segnale dall'esterno.

Un esempio di multivibratore bistabile (denominato anche flip-flop) è illustrato in figura 16.17a: uno stato di funzionamento stabile corrisponde alla condizione $U_{a1} = U_{CE1}$ e al secondo la condizione opposta $U_{CE1} = 0, U_{CE2} = U_{a1}$.

Il passaggio dall'una all'altra condizione viene realizzato inviando alle basi dei transistori, mediante appositi circuiti, degli impulsi di tensione che portano in conduzione il transistor che si trova in stato di interdizione o viceversa. Nella figura 16.17b sono raffigurate le forme dei segnali rilevabili sui collettori dei transistori T_1 e T_2 della figura 16.17a.

16.6 - Circuiti integrati

I circuiti integrati sono dispositivi costituiti da una piastrina di semiconduttore di dimensioni ridotte (chip) nella quale sono ricavati, tramite tecniche speciali, numerosi elementi attivi e passivi in grado di svolgere determinate funzioni circuitali.

L'esigenza di utilizzare nel settore elettronico componenti di dimensioni sempre più piccole ha portato allo sviluppo di tecnologie costruttive per mezzo delle quali è possibile realizzare, entro la stessa parte attiva di un semiconduttore (chip), numerosi elementi attivi o passivi in grado di contribuire allo svolgimento di complesse operazioni circuitali. Tale tipo di componente, denominato

circuito integrato, si presenta sotto forma di una piastrina di silicio inserita in un apposito contenitore (package) dal quale fuoriescono solo dei contatti (pins). Il contenitore può assumere forme differenti: TO, DUAL E FLAT (Figura 16.18).

Tra i vantaggi più evidenti dei circuiti integrati rispetto a quelli discreti si possono elencare: minor peso, dimensioni più ridotte, maggior affidabilità, minor costo.

A questi vantaggi si contrappongono, però, alcuni vincoli costituiti essenzialmente dalla limitata potenza che gli integrati possono pilotare e dalla necessità di sostituire l'intero circuito integrato anche in caso di guasto di un solo componente circuitale.

I circuiti integrati si possono suddividere in base a due criteri: tecniche di realizzazione e campi di utilizzazione.

Per ciò che riguarda la tecnologia costruttiva si possono ancora distinguere due tipi: monolitici e a film.

Nel primo caso tutti gli elementi circuitali, attivi e passivi vengono realizzati contemporaneamente in un unico chip mediante successive ed appropriate operazioni di drogaggio (tecnologia planare). Si possono quindi avere elementi lineari come resistenze e capacità, connessioni a bassa resistenza e zone isolate.

I circuiti integrati a film sono invece costituiti da un supporto, che può essere in alluminio (a film spesso o thick-film) o di ceramica (a film sottile o thin-film), sul quale è stato depositato con tecniche speciali, uno strato di materiale semiconduttore. Su questo strato vengono ricavati, con metodo serigrafico, gli elementi conduttori e lineari ai quali vengono poi connessi i diodi e i transistori necessari per ottenere funzione circuitale richiesta (Figura 16.19).

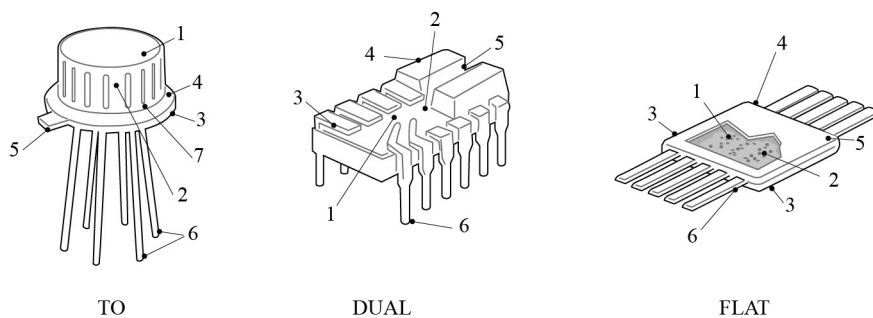


Figura 16.18 - Soluzioni costruttive e di contenitori per circuiti integrati:

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 - filo di collegamento; | 5 - tacca di riferimento; |
| 2 - piastrina (chip); | 6 - piedini (pins); |
| 3 - base; | 7 - basetta isolata. |
| 4 - copertura; | |

Sul piano applicativo si possono avere circuiti integrati digitali o analogici.

I tipi digitali vengono prodotti con processi costruttivi che permettono di realizzare sistemi logici e matematici che operano sulla base degli stati si e no (algebra di Boole) ovvero delle situazioni di presenza di tensione, assenza di tensione. Questi integrati sono alla base della costruzione degli attuali calcolatori elettronici in quanto capsule monolitiche di forma quadrata con il lato di 1 mm possono contenere anche un centinaio di unità di memoria e di elaborazione.

I circuiti integrati di tipo analogico rappresentano invece la soluzione costruttiva miniaturizzata dei circuiti elettronici di uso più frequente in campo industriale, ad esempio, i vari tipi di amplificatore. Ciò consente di ottenere elementi unici intercambiabili in grado di svolgere funzioni standard, come

l'amplificazione di un segnale per le quali prima era necessario un circuito elettronico complesso costituito da più componenti.

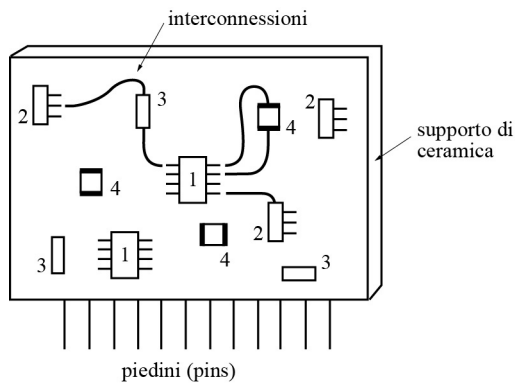


Figura 16.19 - Circuito integrato a film:
 1 - circuito integrato monolitico;
 2 - transistori;
 3 - resistori a film;
 4 - condensatori.

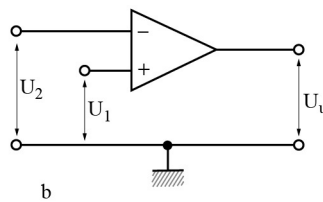
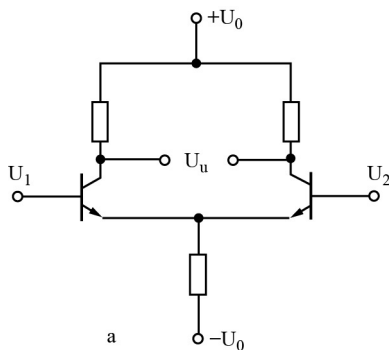


Figura 16.20 - Schema di principio (a) e segno grafico (b) di un amplificatore operazionale.

16.7 - Esempio di circuito integrato: l'amplificatore operazionale

Il circuito integrato più importante e di impiego più diffuso in elettronica è costituito dall'amplificatore operazionale. Si tratta di un amplificatore a due ingressi che, tramite opportuni collegamenti esterni, può svolgere numerose funzioni quali generare o comparare segnali nonché eseguire operazioni aritmetiche (somma, sottrazione ecc.) su segnali applicati contemporaneamente agli ingressi.

L'amplificatore operazionale è caratterizzato da un alto guadagno, elevata impedenza d'ingresso e bassa impedenza di uscita.

Il più importante e più utilizzato componente integrato monolitico lineare è l'amplificatore operazionale.

Con questo termine si indica un amplificatore dotato di due circuiti d'ingresso che permettono di accettare segnali di entrambe le polarità e di eliminare, sul segnale di uscita, la presenza della tensione di polarizzazione.

Lo schema di principio di un amplificatore operazionale può essere quello di figura 16.20 in cui si distinguono con U_1 e U_2 i segnali di entrata, con $+U_0$ e $-U_0$ le tensioni di polarizzazione e con U_u la tensione di uscita. Nella stessa figura è riportato il segno grafico usato per la rappresentazione dell'amplificatore.

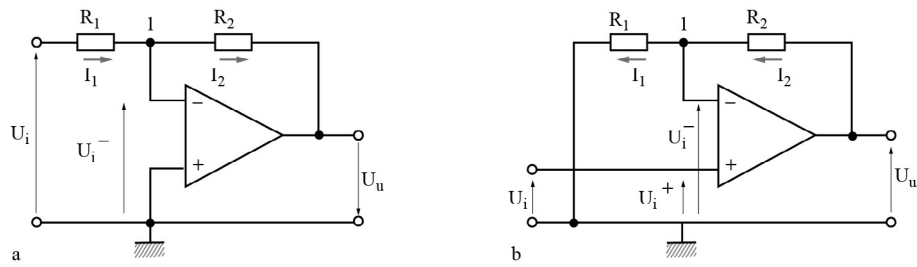


Figura 16.21 - Amplificatore operazionale nella configurazione invertente (a) e non invertente (b).

L'amplificatore operazionale, che è caratterizzato da un elevatissimo guadagno (anche superiore a 100 000), una elevata impedenza d'ingresso ed una bassa impedenza d'uscita, può amplificare sia segnali in corrente continua oppure lentamente variabili, sia segnali in corrente alternata di frequenza variabile tra pochi hertz sino a parecchie decine di megahertz.

Si possono distinguere amplificatori operazionali in configurazione invertente e non invertente a seconda del tipo di reazione prevista (Figura 16.21a).

Si dice invertente quello che fornisce in uscita un segnale amplificato, ma di segno cambiato (Figura 16.21b).

L'amplificatore operazionale può anche svolgere funzioni diverse da quelle di semplice amplificatore del segnale di ingresso.

Con opportune configurazioni circuitali esterne l'amplificatore operazionale può infatti effettuare operazioni di somma, differenza, moltiplicazione, integrazione ecc. sui segnali d'ingresso.