

Uso dell'oscilloscopio analogico

Parecchi sono i motivi che rendono l'oscilloscopio uno dei principali strumenti per l'analisi e il test non solo di strutture elettroniche, ma anche di tutti quei sistemi nei quali l'impiego di opportuni trasduttori permette di avere a disposizione dei segnali elettrici indipendentemente dalla natura fisica delle originali grandezze da analizzare.

La funzione principale di un oscilloscopio consiste essenzialmente nel rappresentare sullo schermo di un tubo a raggi catodici l'andamento di una generica tensione v_y in funzione di un'altra tensione v_x cioè fornire la curva:

$$v_y = f(v_x)$$

Tale curva è generalmente rappresentata rispetto a una coppia di assi cartesiani ortogonali; in qualche caso vengono utilizzati anche diagramma di tipo polare, che non saranno però presi in esame in quanto segue.

La modalità di funzionamento più usuale per un oscilloscopio consiste nel rendere una delle due tensioni, generalmente la v_x proporzionale al tempo; è così possibile visualizzare sullo schermo l'andamento temporale della tensione v_y

$$v_y = g(t)$$

in questo caso si dice che l'oscilloscopio funziona in *base dei tempi*.

L'andamento temporale di un segnale può essere ottenuto anche mediante altri strumenti, che assumono diverse denominazioni, come ad esempio registratori plotter o altro, ma che fondamentalmente sono formati da un equipaggio scrivente in grado di lasciare una traccia su carta; in ogni caso, però, poiché l'equipaggio scrivente è dotato di una inerzia non trascurabile, è possibile tracciare il diagramma temporale solo di segnali che evolvono molto lentamente.

In un oscilloscopio, invece, l'elemento scrivente è formato da un fascio di elettroni che eccita, provocando l'emissione di energia luminosa, delle opportune sostanze depositate sullo schermo di un tubo a raggi catodici, rendendo in tal modo visibile la sua posizione. Essendo l'inerzia del fascio di elettroni particolarmente piccola, è possibile visualizzare l'andamento temporale anche di segnali che variano molto rapidamente.

È interessante rappresentare sullo schermo dell'oscilloscopio anche l'andamento della curva $v_y = f(v_x)$, dove v_x e v_y provengono entrambe dall'esterno; si dice in questo caso che l'oscilloscopio è utilizzato in modalità *xy*.

Anche se meno frequente, esiste una terza possibilità di impiego di un oscilloscopio nella quale si utilizza un ulteriore segnale esterno v_z mediante il quale si ottiene una modulazione dell'intensità del fascio elettronico di scrittura, di solito nella forma "tutto o niente". In questo caso si dice che si agisce sull'asse z; è possibile eseguire in tal modo alcune interessanti misurazioni.

Da quanto detto è quindi facile intuire le notevoli possibilità applicative di un oscilloscopio. Nel seguito sarà presentata la struttura generale di questo strumento; in particolare, i singoli blocchi costituenti saranno illustrati da un punto di vista funzionale; le corrispondenti realizzazioni circuitali dipendono infatti dell'evoluzione della tecnologia elettronica, dal costruttore e dal modello considerato.

1. Struttura generale di un oscilloscopio

In una schematizzazione di prima approssimazione si può suddividere un oscilloscopio in tre blocchi fondamentali (Fig.1):

- il tubo a raggi catodici sul cui schermo si ottiene la visualizzazione della curva $v_y=f(v_x)$. Il posizionamento del fascio, o pennello, elettronico su un punto dello schermo è ottenuto applicando le due tensioni v_x e v_y su due distinte coppie di placchette di deflessione tra loro ortogonali.
- un blocco per il condizionamento del segnale di tensione che agisce sulla coppia di placchette per la deflessione lungo l'asse y (deflessione verticale).
- un blocco per il condizionamento del segnale di tensione che agisce sulla coppia di placchette per la deflessione lungo l'asse x (deflessione orizzontale).

Si fa presente che la tensione inviata sull'asse x può provenire dall'esterno, oppure essere generata internamente allo strumento. Nel primo caso essa deve essere condizionata in modo simile al segnale v_y . Il secondo caso è invece utilizzato quando si desidera tarare l'asse x in unità temporali per visualizzare sullo schermo la tensione v_y nel tempo; sono allora richiesti vari blocchi interni sia per la generazione del segnale adatto alla deflessione orizzontale, sia per sincronizzare tale segnale con quello presente sull'asse verticale in modo da visualizzare la traccia sullo schermo.

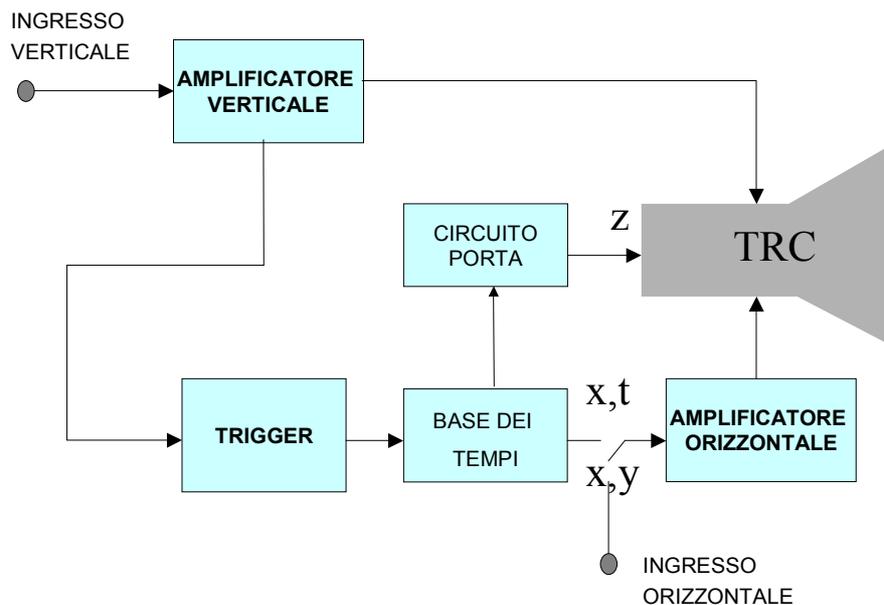


Fig. 1 Schema a blocchi di un oscilloscopio analogico

2 Condizionamento del segnale per la deflessione verticale

Il segnale di ingresso presenta raramente le caratteristiche necessarie per poter essere applicato direttamente alle placchette di deflessione. Infatti, poiché l'ordine di grandezza di una normale sensibilità di deflessione verticale S_y è di circa 1 mm/V , per avere delle deflessioni facilmente valutabili si deve applicare alle placchette un segnale dell'ordine di qualche decina di V. D'altra parte, poiché si desidera che il campo di ingresso sia piuttosto ampio, è spesso necessario un preliminare condizionamento dei segnali da analizzare; generalmente tale condizionamento è ottenuto mediante successive attenuazioni e amplificazioni.

Spesso inoltre il segnale di ingresso è di tipo sbilanciato, ossia contiene sia una componente di modo comune, sia una componente di modo differenziale; per applicare alle placchette di deflessione un segnale bilanciato, il blocco di condizionamento deve pertanto fornire una uscita bilanciata anche quando l'ingresso è sbilanciato. Una rappresentazione schematica di tale blocco è riportata in figura.

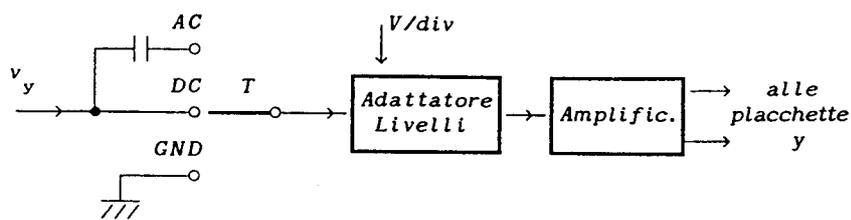


Fig. 2 Blocco di condizionamento del segnale di deflessione verticale.

Se interessa anche la componente continua del segnale, il commutatore T di Fig. 2 deve essere posto nella posizione DC; se invece interessa visualizzare solo le componenti alternate, conviene posizionare il commutatore T in AC, inserendo così il condensatore C in serie. Normalmente il valore della capacità è scelto in modo da ottenere una frequenza di taglio inferiore di circa 10 Hz. Per poter sopportare anche tensioni di ingresso di una certa entità (dell'ordine delle centinaia di volt), il condensatore C deve presentare una tensione di isolamento molto elevata (fino a migliaia di volt).

Spesso è inoltre prevista una terza posizione del commutatore T, in modo da consentire il collegamento a massa dell'ingresso dell'attenuatore; è così possibile controllare facilmente la posizione di riferimento della traccia sullo schermo ed eventualmente intervenire mediante un apposito comando per ottenere il suo spostamento.

Il blocco adattatore di livelli consente di variare il fattore di deflessione complessivo utilizzando un commutatore esterno, ossia di modificare la taratura verticale del reticolo (V/div) fino a ottenere il valore più conveniente per un dato segnale di ingresso. Viene richiesto inoltre che tale blocco presenti una impedenza di ingresso costante al variare della posizione del commutatore; generalmente si ottengono in ingresso resistenze dell'ordine di 1-10 M Ω , con in parallelo una capacità di qualche decina di pF.

Il blocco adattatore viene normalmente realizzato utilizzando amplificatori a guadagno variabile in salita e in discesa, agendo sui quali si può scegliere la taratura dell'asse verticale. Normalmente sono disponibili i seguenti fattori di scala, espressi in V/div:

$$5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1, 0,05, 0,02, 0,01$$

Caratteristiche Metrologiche del Blocco di Deflessione Verticale.

La caratterizzazione metrologica del blocco di condizionamento per la deflessione verticale richiede la conoscenza di diversi parametri, fra cui si ricordano la banda passante, l'amplificazione e il tempo di salita.

Poiché è previsto anche un funzionamento in DC, il blocco di condizionamento deve comportarsi come un sistema passa basso, per cui la sua banda passante coincide con la frequenza di taglio superiore, convenzionalmente valutata in corrispondenza a una attenuazione di 3 dB.

Di solito non viene fornito il valore dell'amplificazione, ma quello del minimo coefficiente di deflessione; da tale valore è immediato dedurre l'ordine di grandezza della minima tensione apprezzabile dall'oscilloscopio.

Come è noto, all'aumentare del valore dell'amplificazione si ha una corrispondente diminuzione della banda passante. Pertanto, se un oscilloscopio viene progettato per visualizzare segnali molto piccoli, la sua frequenza di taglio superiore non può essere molto elevata.

Un altro parametro di notevole interesse del blocco di condizionamento è costituito dal tempo di salita T_S , ossia dal tempo necessario affinché la traccia sullo schermo si porti dal 10% al 90% del suo valore finale quando all'ingresso è applicata una sollecitazione a gradino ideale. Tra il tempo di salita e la larghezza di banda di un amplificatore esiste un ben preciso legame, dipendente dal tipo di funzione di trasferimento realizzata. Nel caso di un sistema a un solo polo o, più in generale, di un sistema con un polo dominante, tale legame è dato dalla seguente relazione:

$$T_S B \cong 0.35$$

Noto uno dei due parametri è pertanto possibile ricavare l'altro. Nel caso in cui devono essere tenuti presenti più poli della funzione di trasferimento, il prodotto $T_S B$ può assumere valori superiori (fino a 0.5).

Se il segnale presenta un tempo di salita T_{S1} e il blocco di amplificazione ha un tempo di salita T_{S2} , il tempo di salita corrispondente alla traccia visualizzata sullo schermo dell'oscilloscopio è ottenibile mediante l'espressione:

$$T_s^2 = T_{S1}^2 + T_{S2}^2$$

Ricavato il valore di T_S e nota la larghezza di banda dello strumento, è pertanto possibile ricavare il tempo di salita del segnale applicato. Ovviamente, poiché il valore di T_{S1} è

ottenuto mediante una differenza, l'incertezza relativa del risultato aumenta quanto più il valore di T_S è prossimo a quello del tempo di salita T_{S2} proprio dell'oscilloscopio.

3 La deflessione orizzontale

Per quanto riguarda la deflessione orizzontale, un oscilloscopio ha due diverse modalità di funzionamento, denominate xy e base dei tempi.

Nel funzionamento in xy, alle placchette di deflessione orizzontale viene inviata una tensione v_x proveniente dall'esterno e la traccia sullo schermo riproduce il diagramma cartesiano della funzione $v_x = f(v_y)$ dove v_y rappresenta al solito il segnale di tensione applicato al blocco di deflessione verticale. Prima di essere inviata alle placchette di deflessione orizzontale, la tensione v_x deve quindi subire un condizionamento del tutto analogo a quello visto per il segnale di deflessione verticale.

Il funzionamento in base dei tempi è il modo più usuale di utilizzare un oscilloscopio; in questo caso l'asse x viene tarato in una unità temporale. Per ottenere una deflessione x proporzionale al tempo è necessario applicare una tensione v_x che varia linearmente con il tempo stesso; questa tensione è generata da un blocco interno allo strumento e denominato base dei tempi.

Un possibile andamento temporale di v_x è illustrato in Fig. 3. Quando la tensione assume il suo valore minimo pari a $-V_x$ il pennello elettronico si trova all'estremità sinistra dello schermo; aumentando la tensione, il pennello si sposta verso l'estremità destra, che viene raggiunta per $v_x = +V_x$. Successivamente, in condizioni ideali, il fascio viene riportato istantaneamente all'estremità sinistra, per poi iniziare un nuovo spostamento verso destra. La pendenza della rampa determina la velocità dello spostamento del pennello e rappresenta quindi la costante di taratura dell'asse x in una data unità temporale.

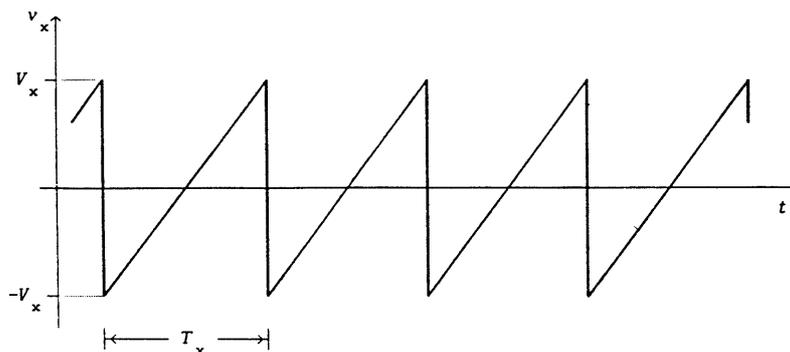


Fig. 3. Andamento temporale ideale della tensione di deflessione orizzontale

Si supponga ora di applicare all'asse y una tensione periodica di periodo T_y . Sullo schermo sarà allora visualizzata un'unica traccia solo se il periodo T_x della tensione a dente di sega v_x coincide con un multiplo intero del periodo T_y di v_y ; in particolare, se $T_x = m T_y$, con m intero, sullo schermo saranno visualizzati m periodi di v_y .

Se tale relazione non è soddisfatta, invece, a ogni spazzolata il pennello elettronico descrive una traccia diversa dalla precedente; sullo schermo sarà così visualizzato un insieme di tracce sovrapposte in modo disordinato, da cui è generalmente difficile dedurre l'andamento temporale del segnale. In Fig. 3.16 riportato in forma semplificata quanto appare sullo schermo quando all'ingresso è presente un segnale sinusoidale e non è soddisfatta la condizione $T_x = m T_y$

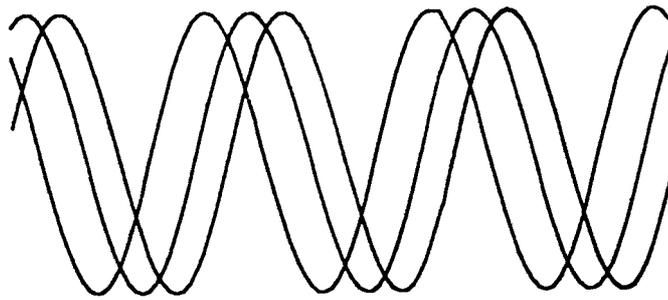


Fig. 4. Immagine visualizzata sullo schermo in assenza di sincronizzazione quando il segnale di ingresso è sinusoidale.

In Fig. 4 sono riportate le tracce corrispondenti a tre diverse spazzolate; in pratica, la sovrapposizione di un numero molto elevato di tracce non sincronizzate può far apparire sullo schermo una fascia luminosa di ampiezza pari al valore di picco-picco della tensione sinusoidale presente all'ingresso.

Si deve notare che la relazione $T_x = m T_y$ fornisce solo una condizione sufficiente, ma non necessaria, per la sincronizzazione; infatti, ad esempio, tale relazione non permette di visualizzare un numero non intero di periodi del segnale v_y . Per ottenere una traccia stabile è spesso sufficiente che il pennello elettronico parta dal margine sinistro dello schermo quando il segnale v_y :

- assume un valore prefissato;

- ha la derivata (pendenza) di un determinato segno.

In questo modo è infatti spesso possibile individuare univocamente un generico punto del segnale. Ad esempio, in Fig. 5 è riportato l'andamento richiesto alla tensione v_x per visualizzare una porzione di durata $0.75 T_y$ del segnale v_y a partire da un valore nullo e con derivata positiva.

Si noti che per garantire la visualizzazione di una traccia stabile è sufficiente la ripetizione nel tempo solamente della porzione visualizzata; negli intervalli di tempo compresi fra una spazzolata e la successiva non è richiesto che il segnale presenti la stessa forma d'onda; non è cioè strettamente necessario che il segnale sia periodico, ma è sufficiente che si ripeta la sola porzione di segnale che si vuole visualizzare. Questa classe di segnali prende il nome di ripetitivi e ovviamente contiene al suo interno anche la più ristretta classe dei segnali periodici.

La figura mostra che la tensione v_x , oltre a presentare la rampa necessaria per lo spostamento del pennello elettronico dall'estremità sinistra a quella destra dello schermo, deve anche contenere un tratto costante per permettere l'attesa dei verificarsi delle condizioni richieste per la partenza di una nuova spazzolata; deve cioè essere realizzata una sincronizzazione tra l'istante di partenza della rampa e il punto iniziale della porzione di segnale da visualizzare.

Per ottenere la sincronizzazione è pertanto necessario utilizzare un circuito sensibile al livello e al segno della derivata della tensione v_y . Quando si verificano le condizioni di livello e di pendenza poste, il circuito di sincronizzazione fornisce in uscita un segnale di tipo impulsivo, denominato *trigger* (grilletto), che viene utilizzato per comandare la partenza della rampa generata dalla base dei tempi.

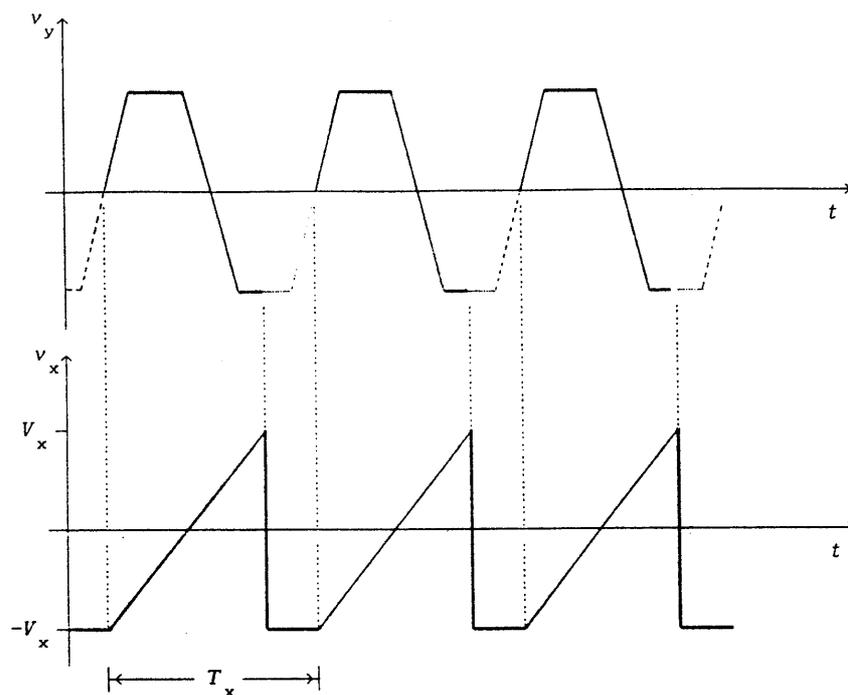


Fig. 5 Andamento della tensione v_x necessaria per visualizzare una porzione di durata $0.75 T_y$ del segnale v_y

Per adattare il funzionamento di un oscilloscopio alle diverse esigenze riscontrabili in pratica, la base dei tempi deve:

- generare una rampa di pendenza variabile; ciò permette infatti di variare il tempo necessario per spostare il pennello elettronico dal margine sinistro dello schermo a quello destro, e quindi di visualizzare una diversa porzione del segnale;
- essere in grado di riportare il pennello elettronico dal margine destro dello schermo a quello sinistro nel più breve tempo possibile;
- attendere l'arrivo del nuovo impulso di trigger che comanderà la partenza della rampa successiva.

Per evitare errate interpretazioni della forma d'onda visualizzata, durante il ritorno dal margine destro dello schermo a quello sinistro è conveniente rendere invisibile il pennello elettronico; ciò può essere ottenuto interdicendo il fascio di elettroni durante questo intervallo di tempo. A tale scopo basta portare il potenziale della griglia G , che controlla l'intensità del fascio elettronico, a un valore sufficientemente negativo da impedire l'uscita di elettroni dal catodo. Un'altra soluzione consiste nell'applicare una opportuna tensione a uno degli anodi in modo tale da far deviare il fascio fino a colpire l'anodo stesso.

Da un punto di vista logico si può supporre di generare una tensione, denominata impulso di unblanking, che assume ad esempio un livello alto solamente durante l'attivazione della rampa; dopo un adeguato condizionamento, questa tensione viene applicata alla griglia G, che normalmente assume invece un potenziale tale da respingere gli elettroni provenienti dal catodo; in tal modo si ottiene quindi la visualizzazione della traccia solo durante l'intervallo di tempo previsto.

4. Circuito di sincronismo

I circuiti preposti alla sincronizzazione vengono realizzati con modalità diverse, strettamente legate alle prestazioni generali dell'oscilloscopio, ossia al modo in cui si intende ovviare alla non idealità di ogni componente utilizzato.

Si noti inoltre che il segnale da cui viene ricavato l'impulso di trigger può anche essere diverso da quello inviato al blocco per la deflessione verticale. In un oscilloscopio, infatti, è sempre presente un commutatore che permette tre possibilità di selezione:

- *INT*: in questo caso il segnale da cui viene ricavato l'impulso di trigger è quello inviato all'asse y, come è stato finora supposto;
- *EXT*: in questa modalità l'impulso di trigger viene ricavato da un generico segnale fornito dall'esterno;
- *LINE*: il trigger è ottenuto dal segnale di tensione usato per alimentare l'oscilloscopio; la scansione orizzontale avviene perciò con la stessa frequenza della tensione di alimentazione.

Un possibile schema a blocchi usato per la generazione del segnale di trigger è riportato in Fig. 6. All'inizio della catena viene utilizzato un amplificatore differenziale, il quale fornisce in uscita una tensione proporzionale alla differenza tra le due tensioni applicate ai suoi ingressi. A uno di questi ingressi è applicato il segnale da cui deve essere ricavato il trigger; all'altro ingresso viene invece applicata una tensione costante, il cui valore è fissato tramite un potenziometro, o un qualunque altro elemento variabile (comando level). Un commutatore, manovrabile dal pannello dello strumento, consente inoltre di stabilire quale di questi due segnali deve essere applicato all'ingresso invertente dell'amplificatore differenziale (comando slope).

In Fig. 6 (a.a) è mostrata la tensione di uscita dell'amplificatore differenziale nell'ipotesi di un segnale di ingresso di forma triangolare, quando il livello di riferimento è V_T e il

commutatore è nella posizione 1-1'. Se, al contrario, il commutatore è posto nella posizione 2-2', il segnale di uscita ottenuto ha l'andamento riportato in fig. 6 (a.b).

Agendo sul commutatore si può perciò fare in modo che la componente alternata della tensione di uscita dall'amplificatore, sia in opposizione (1-1'), oppure in fase (2-2'), con il segnale di ingresso. Il potenziometro permette invece di variare la componente costante di tale tensione.

Il segnale di uscita dell'amplificatore differenziale viene poi inviato a un circuito a scatto con isteresi (*blocco squadratore*) avente le due soglie molto vicine fra loro; per semplicità in figura tali soglie sono state supposte entrambe nulle. In uscita da questo blocco si ottiene una tensione con andamento a gradini, come indicato schematicamente nei grafici di fig. 6(c). Il segnale di trigger viene quindi sottoposto all'azione di un circuito derivatore che fornisce due picchi di tensione, uno positivo e uno negativo, in corrispondenza alle variazioni del segnale fornito dal blocco squadratore.

Un successivo circuito limitatore (clipper) elimina uno dei due impulsi, il positivo nello schema di Fig. 6; in uscita si ottiene perciò un impulso negativo in corrispondenza dell'istante in cui il segnale di ingresso ha assunto il valore fissato mediante il potenziometro e una pendenza il cui segno è fissato tramite il commutatore. Tale impulso costituisce il segnale di trigger che comanda la partenza della rampa di deflessione orizzontale.

Questa analisi semplificata mostra come sia possibile ottenere l'impulso di trigger in corrispondenza al punto in cui si desidera far partire la traccia sullo schermo utilizzando circuiti in grado di svolgere le azioni sopra descritte.

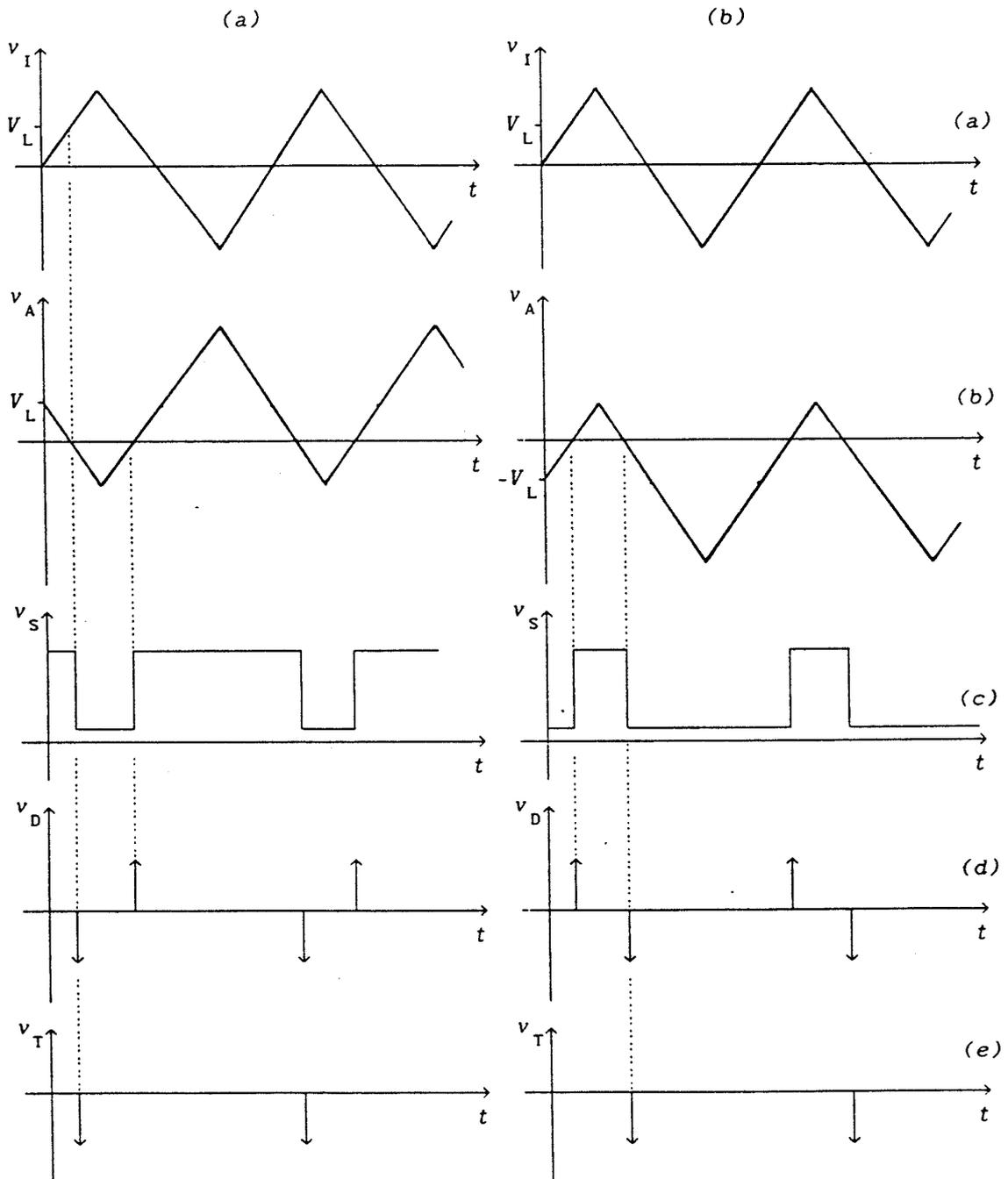
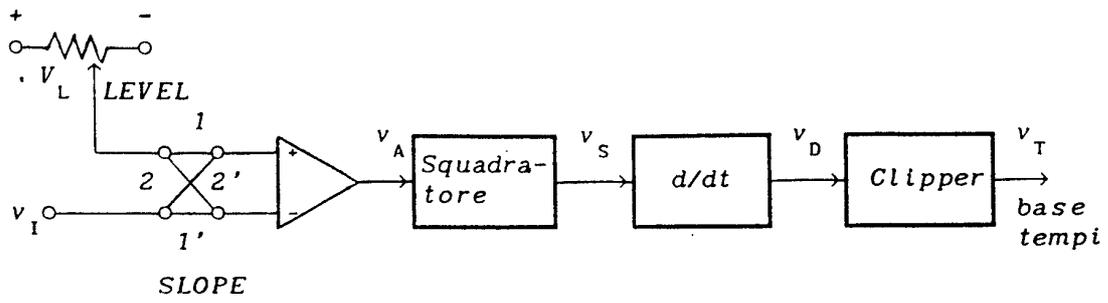


Fig. 6. Schema a blocchi dei circuiti per la generazione del segnale di trigger.

La base dei tempi

Anche la base dei tempi può essere realizzata con diverse modalità; nel seguito viene presentato un semplice schema di principio spesso utilizzato negli attuali oscilloscopi. I blocchi fondamentali sono riportati in Fig. 7, dove sono stati riportati anche gli andamenti temporali di alcune tensioni di interesse.

Il blocco gate può funzionare con diverse modalità, selezionabili mediante un opportuno commutatore manovrabile dal pannello dello strumento, generalmente denominate *NORMAL*, *AUTO* e *SINGLE*.

Si supponga inizialmente di aver posizionato il commutatore in *NORMAL*. In questo caso il gate funziona come un normale comparatore con isteresi, le cui tensioni di soglia V_{GH} e V_{GL} sono molto discoste fra loro, come indicato nel grafico in fig. 7(b). Se si ha $v_I < V_{GL}$, la tensione di uscita del gate assume un livello alto; tale tensione assume invece un livello basso solo se $v_I > V_{GH}$. Per v_I compresa fra V_{GL} e V_{GH} , la tensione v_G di uscita del gate conserva il valore assunto precedentemente.

Come illustrato in Fig. 7, il blocco gate comanda il generatore di rampa; in fig. 7(c), in particolare, si è supposto di sganciare la rampa in corrispondenza al fronte di salita della tensione v_G di uscita del gate.

Il generatore di rampa può essere costituito, ad esempio, da un circuito integratore seguito da un amplificatore; è così possibile ottenere la tensione linearmente, crescente che, applicata alle placchette di deflessione orizzontale, consente di spostare il fascio elettronico dal margine sinistro al margine destro dello schermo. Tale blocco deve inoltre generare la tensione che permette di riportare il pennello elettronico nella posizione iniziale il più velocemente possibile; viene inoltre generato anche l'impulso di unblanking che consente di visualizzare la traccia solo nell'intervallo di tempo durante il quale la rampa è attiva.

Il blocco di hold-off può essere realizzato in molti modi diversi; in ipotesi di funzionamento ideale, però, il suo comportamento dal punto di vista ingresso-uscita può essere così schematizzato:

- il valore V_{HO} assunto a riposo della tensione di uscita v_H è compreso fra le due tensioni di soglia del gate;
- quando la tensione di ingresso è costituita da una rampa di pendenza positiva, l'uscita è proporzionale all'ingresso;

- quando la tensione di ingresso decresce, il blocco di hold-off si comporta come un circuito monostabile, ossia mantiene in uscita, per un intervallo di tempo la cui durata è regolabile mediante un comando esterno, il valore di tensione presente all'istante in cui cambia il segno della pendenza della rampa di ingresso. Trascorso tale tempo, la sua tensione di uscita si riporta, con un andamento a scatto, al valore iniziale V_{HO} .

Per illustrare il funzionamento dello schema di Fig. 7, si supponga che la tensione fornita dal blocco di hold-off abbia inizialmente il valore V_{HO} e che il blocco di gate abbia una tensione di uscita a livello logico basso; il funzionamento del generatore di rampa è quindi inibito, per cui la tensione di uscita v_R assume un valore costante pari a V_B .

Si supponga ora che all'istante t_0 si manifesti l'impulso di trigger δ_a . Poichè la tensione $v_I = v_T + v_H$ assume un valore minore della tensione di soglia inferiore V_{GL} , si ha la commutazione del gate; nelle ipotesi fatte, la tensione v_G assume quindi un valore logico alto; viene perciò sganciata la rampa di pendenza positiva, che consente lo spazzolamento orizzontale dello schermo. Tale tensione è inoltre presente anche in uscita del blocco di hold-off, per cui la tensione v_I in ingresso al gate ha l'andamento illustrato in Fig. 7(b). Se all'istante t_1 si manifesta un altro impulso di trigger δ_b , il funzionamento del circuito non viene pertanto modificato e la tensione v_R continua a crescere linearmente.

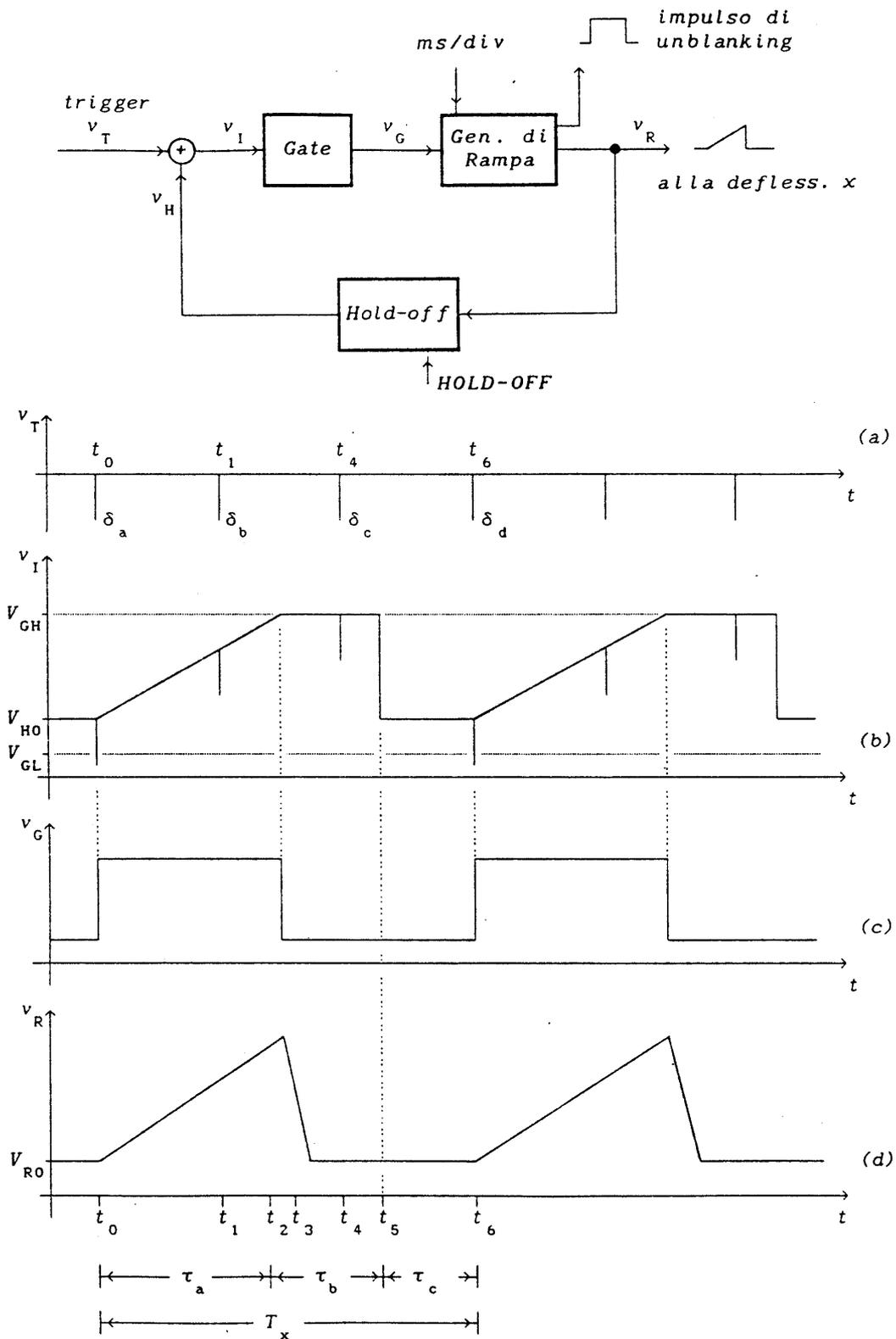


Fig. 7. Schema a blocchi della base dei tempi e diagrammi temporali relativi alle tensioni nei vari punti dello schema.

All'istante t_2 la tensione v_I raggiunge la tensione di soglia superiore V_{GH} ; ciò provoca la commutazione del gate e il rapido ritorno della tensione v_R al valore di riposo V_B , che viene raggiunto nell'istante t_3 . Il fascio elettronico è ora posizionato sul margine sinistro dello schermo. Dopo un certo intervallo di tempo, dipendente dai ritardi introdotti dai diversi circuiti, il generatore è in grado di fornire una nuova rampa.

Dall'istante t_2 , inoltre, a causa del cambiamento del segno della pendenza della tensione v_R , il blocco di hold-off funziona come un circuito monostabile; la sua tensione di uscita v_H assume perciò il valore costante V_{GH} per un intervallo di tempo di durata prefissata; all'istante t_5 tale tensione raggiunge poi il valore di riposo V_{HO} con un andamento a scatto.

Si desidera in particolare notare che l'impulso δ_c che si manifesta all'istante $t_4 < t_5$ non provoca alcun effetto sul circuito.

Il valore minimo della durata del funzionamento monostabile del blocco di hold-off viene scelto in modo tale che quando v_H ritorna al valore iniziale V_{HO} il generatore sia in grado di fornire una nuova rampa. In Fig. 7 la rampa riparte all'istante t_6 in corrispondenza al manifestarsi dell'impulso di trigger δ_d .

Utilizzando la simbologia di fig. 7, se si suppone che il segnale di ingresso sia periodico di periodo T_y per ottenere sullo schermo una traccia stabile deve essere soddisfatta la condizione:

$$T_x = \tau_a + \tau_b + \tau_c = mT_y$$

dove m è un qualsiasi numero intero positivo.

La relazione mostra che il periodo T_x del segnale v_x viene scomposto in tre sotto-intervalli:

- τ_a : rappresenta l'intervallo di tempo durante il quale viene visualizzata la porzione di segnale di interesse;
- τ_b : è il tempo richiesto per permettere a tutti i circuiti di ripristinare le loro condizioni iniziali in modo da essere in grado di ripartire con una successiva spazzolata; in questo intervallo di tempo il pennello elettronico viene portato sul margine sinistro dello schermo; per rendere invisibile la traccia di ritorno l'intensità del pennello viene annullata;
- τ_c : è il tempo di attesa necessario per consentire la sincronizzazione del sistema di deflessione, pronto a partire, con il segnale di ingresso.

Si noti che τ_a non deve necessariamente essere legato al periodo T_y . La sincronizzazione della base dei tempi con il segnale da visualizzare è infatti ottenuta mediante la relazione precedente. In particolare, la possibilità di intervenire sulla durata τ_b di funzionamento

monostabile del circuito di hold-off consente un ampio margine di libertà nella scelta di \square_a come sarà mostrato tra breve.

Non sempre però il circuito per la deflessione orizzontale presenta un blocco di hold-off del tipo illustrato in Fig. 7.

Per ottenere la visualizzazione, lo schema di Fig.7 richiede la generazione di un impulso di trigger, il quale si verifica solamente se sono soddisfatte le condizioni imposte mediante i comandi di livello e di pendenza, rappresentati rispettivamente dal potenziometro e dal commutatore di Fig. 6. In caso contrario, pertanto, sullo schermo non viene visualizzata alcuna traccia.

L'assenza della traccia dallo schermo non fornisce però alcuna indicazione sul comando che deve essere utilizzato per ottenere la visualizzazione. Ad esempio, la mancata visualizzazione può essere imputata sia a un mancato sincronismo, sia a un errato impiego del comando per il posizionamento verticale della traccia stessa, o a qualche altro motivo.

Per risolvere i problemi legati alla sincronizzazione, si può porre il commutatore che consente di selezionare la modalità di funzionamento del gate nella posizione AUTO; in tal caso, anziché funzionare come un trigger di Schmitt, il gate può essere considerato funzionalmente un circuito oscillatore astabile, ossia un generatore di onda quadra con un periodo di oscillazione proprio. Una delle soluzioni spesso adottate consiste nel far generare automaticamente da un blocco, non indicato in Figura, un impulso di trigger se dall'ultimo impulso è trascorso un intervallo di tempo superiore a una soglia fissata. In assenza di impulsi effettivi di trigger la tensione v_G di ingresso del generatore di rampa è quindi un'onda quadra. Si ottiene così la generazione di una rampa periodica che consente di visualizzare il segnale di ingresso anche in assenza di sincronizzazione. In particolare, se il segnale di ingresso è assente, sullo schermo viene visualizzata una linea orizzontale. Se ciò non avviene, si può sospettare un errato impiego di qualche altro comando, come ad esempio quello per il posizionamento verticale della traccia; non è infine da escludere un malfunzionamento dell'oscilloscopio stesso.

È possibile, ma non certo, ottenere la sincronizzazione anche quando il gate funziona in condizione AUTO: basta infatti condizionare il periodo di oscillazione mediante gli impulsi di trigger effettivi. In questo caso il periodo di oscillazione del circuito astabile può essere fatto coincidere con un numero intero di impulsi di trigger; sono quindi soddisfatte le condizioni per avere sullo schermo la visualizzazione stabile di una porzione del segnale di ingresso. Per ottenere questo risultato devono però essere soddisfatte alcune relazioni tra il periodo di

oscillazione libera del blocco di gate funzionalmente simile a un astabile e quello degli impulsi di trigger. In altre parole con il gate predisposto in AUTO è possibile, ma non certa, la sincronizzazione.

In parecchi oscilloscopi è inoltre prevista una ulteriore modalità di funzionamento del blocco di gate, denominata SINGLE (oppure one shot o single shot); in questa modalità ogni singola spazzolata richiede l'abilitazione mediante un comando esterno.

Uso del Comando di Hold-off

Il comando presente nel blocco di hold-off consente di variare, tra un valore minimo e un valore massimo, l'intervallo di tempo τ_b durante il quale la tensione di uscita da tale blocco viene mantenuta al valore costante V_{GH} .

È in tal modo possibile facilitare la sincronizzazione; in alcuni casi, inoltre, essa può essere ottenuta solamente intervenendo con questo comando.

Si supponga, ad esempio, di voler visualizzare la porzione di durata τ_a del segnale periodico di periodo T_y mostrato in Fig. 8. Come illustrato precedentemente, il punto di partenza della traccia può essere scelto specificando solamente il livello ed il segno della pendenza della forma d'onda. Pertanto, una volta scelto il segno della pendenza (ad esempio quello positivo) e un qualsiasi livello entro il campo di valori assunti dal segnale di Fig. 8, la sincronizzazione può avvenire in corrispondenza a ogni fronte di salita; vengono infatti generati tanti impulsi di trigger quanti sono i fronti di salita. Quindi, se la tensione di uscita dal circuito di hold-off è quella riportata in Fig. 8(b), dopo la visualizzazione degli impulsi 1 e 2 del segnale di ingresso, vengono visualizzati anche gli impulsi 3, 4, e 5, ottenendo così una traccia del tipo riportato in Fig. 8(c) non è stata cioè ottenuta la sincronizzazione desiderata.

A tale scopo è possibile intervenire sul blocco di hold-off variando la durata τ_b dell'intervallo di tempo durante il quale la sua tensione di uscita rimane al valore V_{GH} . La sincronizzazione richiesta può infatti essere ottenuta quando la tensione di uscita dal blocco di hold-off assume l'andamento riportato in Fig. 8(d); sullo schermo saranno allora visualizzati solo gli impulsi 1 e 2, poi gli impulsi 6 e 7, e così via.

Quando non viene usato, è consigliabile posizionare il comando di hold-off al minimo; in caso contrario è infatti possibile perdere una o più porzioni del segnale da visualizzare. Ad esempio, se il segnale di ingresso ha l'andamento riportato in Fig. 8(e), mentre il segnale di uscita dal blocco di hold-off ha l'andamento di Fig. 8 (d), viene visualizzato solamente un periodo del segnale ogni due.

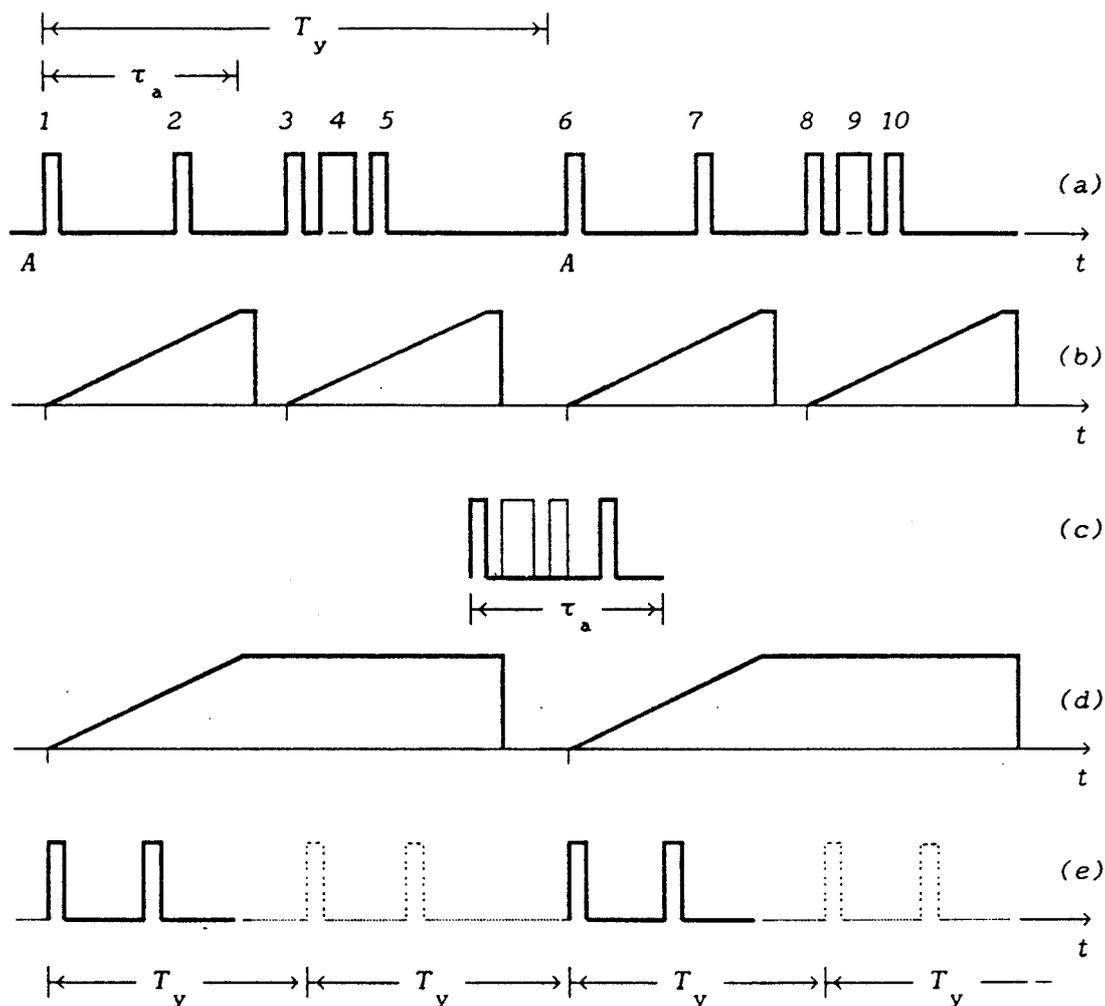


Fig. 8. Sincronizzazione ottenuta operando sul comando di hold-off.

Poiché le soluzioni circuitali che consentono di ottenere le funzioni desiderate sia dal blocco di hold-off, sia dal blocco di gate, sia dal generatore di rampa variano con il progredire della tecnologia dei componenti utilizzati e con il costruttore, non si ritiene opportuno analizzarle in questa sede. Si ricorda comunque che, anche se concettualmente tutti i circuiti per la sincronizzazione presentano caratteristiche molto simili, le diverse realizzazioni possono portare a diverse modalità operative.

Con il circuito descritto in Fig.7, ad esempio, conviene iniziare la visualizzazione con il commutatore in AUTO e il comando di hold-off al minimo; viene poi variata la posizione verticale e l'attenuazione di ingresso fino a ottenere una traccia sullo schermo. Spesso procedendo in questo modo la traccia è già sincronizzata; in caso contrario, per ottenere una traccia stabile conviene porre il commutatore in NORMAL e intervenire sulla pendenza e sul livello del trigger oltre che, eventualmente, sul commutatore della base dei tempi.

5 Oscilloscopi a tracce multiple

Spesso un oscilloscopio consente di visualizzare più tracce contemporaneamente, generalmente due, ma talvolta anche di più, ad esempio quattro o addirittura otto. La visualizzazione di più tracce è utile in quanto permette di ricavare delle informazioni relative alle relazioni esistenti fra i vari segnali visualizzati.

Per illustrare alcune delle modalità di funzionamento, si supponrà nel seguito di avere a disposizione un oscilloscopio a doppia traccia, che costituisce in effetti la situazione più comune. In tal caso si hanno due canali di ingresso, di solito contrassegnati con le lettere A e B.

Esistono diverse soluzioni che consentono di ottenere un oscilloscopio a doppia traccia. Possono ad esempio essere impiegati tubi a raggi catodici a doppio cannone o a doppio fascio; comunemente viene però utilizzato un solo cannone e un solo fascio, il quale viene impiegato per visualizzare entrambi i segnali di ingresso; in questo caso è necessario avere a disposizione un blocco che consenta l'utilizzazione dell'unico fascio disponibile per la visualizzazione di entrambi i segnali.

Questo blocco può funzionare con diverse modalità, ognuna delle quali presenta delle proprie peculiarità; la scelta della modalità più adeguata in una data situazione deve essere fatta in base alle caratteristiche dei segnali da analizzare e alle informazioni richieste. Concettualmente si deve disporre di un commutatore elettronico che consenta di scegliere il segnale di ingresso al quale deve essere assegnato, in un dato intervallo di tempo, l'unico fascio a disposizione. In Fig. 9 è rappresentato uno schema di principio di questo commutatore elettronico.

La chiusura e l'apertura dei due interruttori I_A e I_B è comandata dai due segnali C_0 e C_1 . Considerare aperti entrambi gli interruttori corrisponde a inviare un ingresso nullo al blocco di deflessione verticale; tale situazione assume quindi uno scarso significato. Quando invece entrambi gli interruttori sono chiusi, il successivo blocco sommatore consente di inviare al blocco di deflessione verticale la tensione $v_y = v_{yA} + v_{yB}$; come si vedrà in seguito, tale situazione assume un certo interesse in alcune applicazioni.

Ha però maggior interesse la situazione in cui uno solo dei due interruttori è chiuso. In particolare, se uno dei due interruttori è permanentemente aperto, mentre l'altro è chiuso, il funzionamento dell'oscilloscopio a doppia traccia coincide con quello di un normale oscilloscopio a traccia singola.

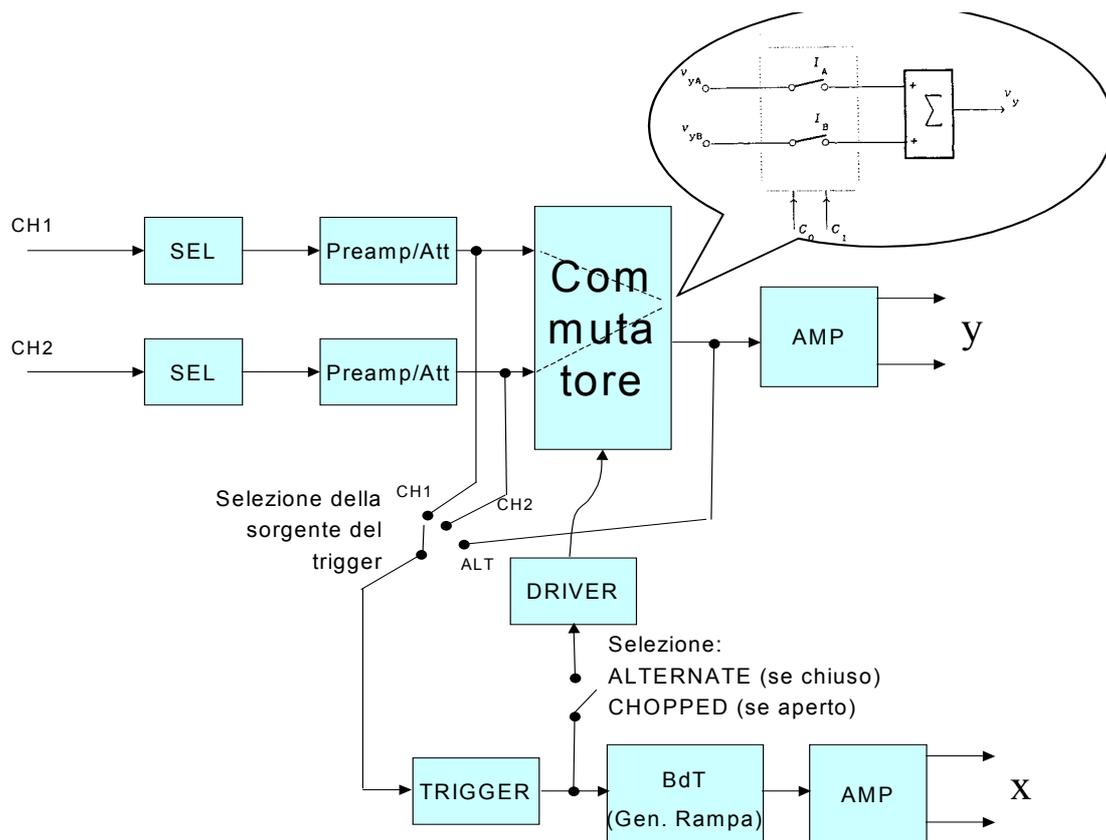


Fig. 9. Schema a Blocchi di un oscilloscopio a doppia traccia.

Quando invece si agisce alternativamente sui due interruttori, al variare della frequenza con cui vengono effettuate le aperture e le chiusure si possono avere diverse modalità di funzionamento.

Se tale frequenza coincide con quella dei segnali di sincronizzazione, durante una spazzolata viene chiuso I_A e aperto I_B ; la posizione di entrambi gli interruttori viene poi variata alla spazzolata successiva. In tal modo viene visualizzato alternativamente uno dei due segnali di ingresso; per tale motivo questa modalità di funzionamento viene denominata “alternate”.

La frequenza delle aperture e chiusure di I_A e I_B può però essere anche molto maggiore di quella relativa a una singola spazzolata. In questo caso vengono visualizzate alternativamente piccolissime porzioni dei due segnali, difficilmente risolvibili dall'occhio dell'operatore; le due tracce appaiono pertanto continue. Per ricordare che le due tracce sono state “affettate”, questo modo di funzionamento viene denominato “chopped”.

In particolare, quando la frequenza di spazzolamento è ridotta, come avviene nel caso di segnali a bassa frequenza dei quali si vuole una traccia sullo schermo composta da uno o da pochi periodi, è conveniente utilizzare il modo chopped; in tal caso, infatti, il modo alternate non è conveniente in quanto il tempo trascorso tra due visualizzazioni successive dello stesso segnale può essere piuttosto lungo.

Quando invece il segnale visualizzato ha una frequenza elevata, il modo chopped è poco indicato in quanto possono venire trascurate delle importanti porzioni di segnale.

In ogni caso è necessario stabilire la modalità con cui generare gli impulsi di sincronismo per la base dei tempi. Nel modo alternate è possibile ricavare l'impulso di trigger da uno solo dei due canali, indipendentemente dal segnale effettivamente visualizzato. Ad esempio se il trigger è generato a partire dal segnale presente nel canale A, con una opportuna predisposizione dei comandi di sincronizzazione la traccia relativa al canale A risulterà stabile. La traccia relativa al canale B, invece, appare sincronizzata solamente se vale la relazione:

$$T_x = m T_{yA} = n T_{yB}$$

con m ed n interi; in caso contrario, invece, la traccia corrispondente a tale canale sarà instabile. Se anche la traccia B è sincronizzata, questo modo di funzionamento consente però di conservare la relazione di fase fra i due segnali.

Per garantire la sincronizzazione di entrambe le tracce è possibile generare il segnale di trigger a partire dal segnale in uscita dal sommatore di Fig. 9; in tal caso, infatti, il sincronismo è sempre ottenuto dal segnale visualizzato, sia che si tratti del segnale A, oppure del segnale B. Purtroppo, poichè entrambe le tracce partono dallo stesso livello e pendenza, viene persa la loro relazione di fase.

In Fig. 10 sono illustrate schematicamente le forme d'onda ottenute utilizzando il modo alternate; i due segnali di ingresso sono stati supposti isofrequenziali e l'impulso di trigger viene generato a partire dal solo segnale A. In Fig.10(c) è riportato l'andamento della tensione di deflessione orizzontale; la partenza della rampa avviene sempre in corrispondenza ai punti M di trigger ottenuti dal segnale v_{yA} . L'immagine ottenuta sfruttando la persistenza dei fosfori è riportata in Fig. 10(d); si noti in particolare che viene mantenuta la relazione di fase esistente tra i due segnali.

Viceversa, se il segnale di sincronismo è ottenuto alternativamente dai due canali (ovviamente con lo stesso livello e pendenza del trigger), l'immagine visualizzata appare come illustrato in Fig. 10(e). In questo modo, al contrario di quanto accade quando il sincronismo è ricavato da un unico canale, si ottengono sempre tracce sincronizzate; viene però persa la relazione di fase.

Nel modo chopped il comando di apertura e di chiusura dei due interruttori I_A e I_B è ottenuto mediante un multivibratore astabile avente una frequenza di oscillazione dell'ordine delle centinaia di kHz. Se i segnali di ingresso hanno frequenza molto minore di quella del multivibratore, la traccia visualizzata è costituita da un numero talmente elevato di tratti successivi da apparire continua.

Con questa modalità di azionamento degli interruttori non è però possibile prelevare il

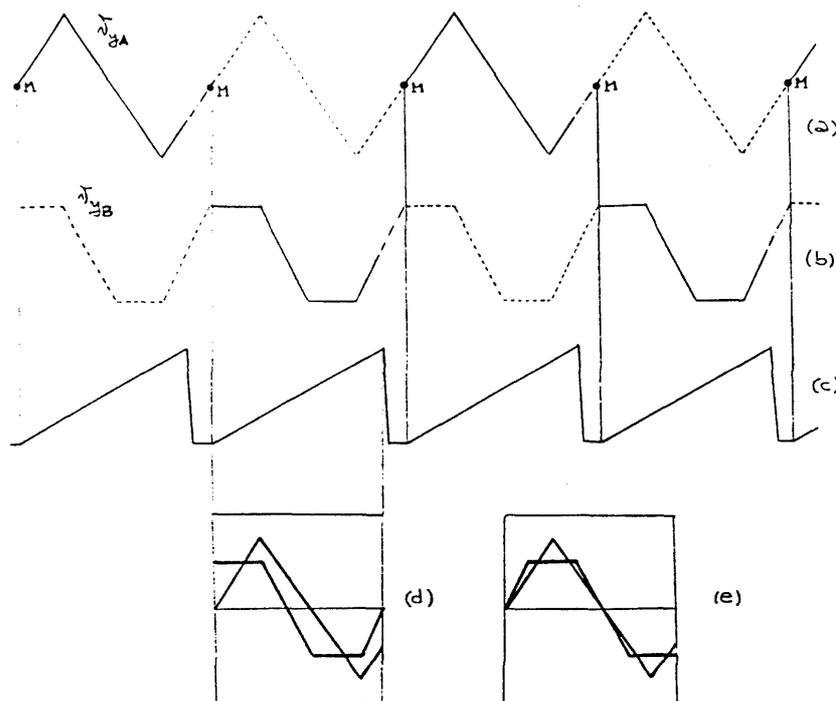


Fig. 10. Visualizzazione di due segnali utilizzando il modo alternate.

segnale di trigger a valle del sommatore; gli impulsi di sincronismo possono pertanto essere ottenuti solamente da un unico canale. Ne consegue che in questo caso è sicuramente conservata la relazione di fase, ma non è garantito il sincronismo di entrambe le tracce.

In Fig. 11 sono illustrate schematicamente le forme d'onda ottenute utilizzando il modo chopped; i due segnali di ingresso sono stati supposti isofrequenziali e l'impulso di trigger viene generato a partire dal solo segnale A. Si noti che l'attività di chopped è stata esagerata per esigenze grafiche.

Il modo di funzionamento chopped pone perciò un limite superiore alla frequenza dei segnali da visualizzare; esso invece è molto adatto alla visualizzazione di segnali a bassa frequenza.

Supponendo che i segnali di ingresso siano periodici e che sullo schermo siano visualizzati al più pochi periodi di tali segnali, si può quindi affermare che il funzionamento chopped è adatto per segnali a bassa frequenza, mentre quello alternate fornisce prestazioni migliori con segnali ad alta frequenza.

Negli oscilloscopi a doppia traccia è spesso prevista una diversa realizzazione della modalità MIXED; viene infatti utilizzato un canale, ad esempio il canale A, per la visualizzazione corrispondente alla rampa principale; la traccia generata a partire dalla base dei tempi ritardata è invece inviata all'altro canale. In tal modo si ottiene sia la visualizzazione del segnale principale, con una sua porzione intensificata, sia l'espansione della porzione intensificata. È così molto semplice controllare l'effetto della variazione sia della tensione continua V_D mediante la quale viene scelto l'inizio del tratto intensificato, sia della pendenza della base dei tempi ritardata con cui viene stabilita la durata del tratto di segnale da espandere.

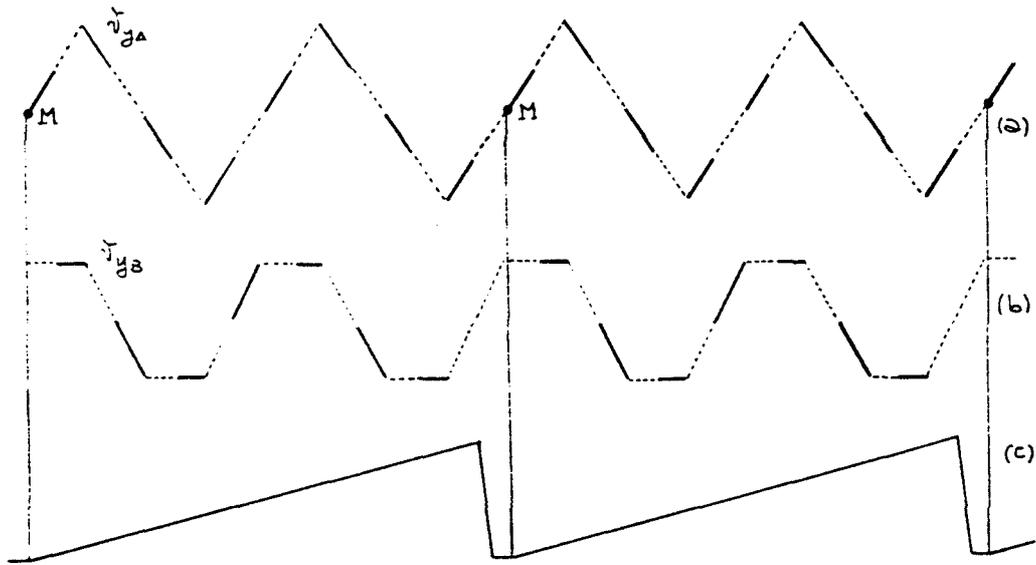


Fig.11. Visualizzazione di due segnali utilizzando il modo chopped.

Si desidera infine illustrare l'utilità del blocco sommatore presente nello schema di fig. 9 considerando un tipico esempio di applicazione. Si noti innanzi tutto che tale blocco consente di ottenere la somma dei due segnali di ingresso solamente quando entrambi gli interruttori I_A e I_B sono chiusi; negli oscilloscopi questa modalità di funzionamento è spesso indicata mediante la sigla A+B.

Si consideri allora il generico circuito rappresentato in Fig. 12 e si supponga di voler determinare la d.d.p. v_{12} tra i punti 1 e 2.

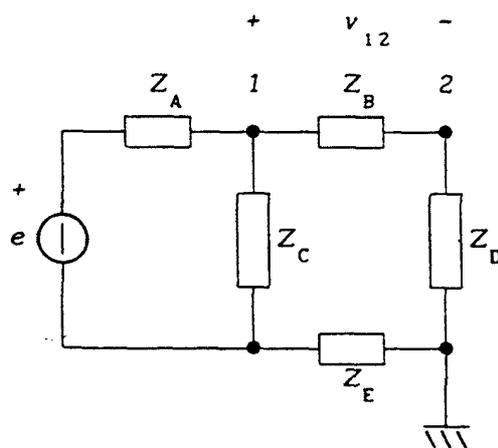


Fig. 12. Schema di una rete elettrica nella quale si desidera valutare la d.d.p. tra i punti 1 e 2.

Normalmente la tensione inviata in ingresso a un qualsiasi canale di un oscilloscopio è riferita al potenziale di massa dello strumento; è infatti raramente possibile operare con

tensioni fuori massa in quanto tutti i circuiti interni dell'oscilloscopio utilizzano questo riferimento per i potenziali. È quindi possibile visualizzare segnali fuori massa solamente interponendo all'ingresso un adeguato trasformatore di isolamento; in questo modo, però, il segnale di ingresso può essere notevolmente distorto, specialmente se presenta componenti significative in un ampio campo di frequenze.

Se invece i due morsetti di ingresso di un canale dell'oscilloscopio vengono collegati direttamente ai punti 1 e 2 di Fig. 12, poiché uno di questi morsetti è sicuramente a massa, il funzionamento del circuito in esame viene alterato; in particolare, è possibile causare addirittura un danneggiamento del circuito stesso ed, eventualmente, dello strumento.

Utilizzando un oscilloscopio a doppia traccia, però, la tensione v_{12} di Fig. 12 può essere determinata inviando ai canali A e B i potenziali v_{1m} e v_{2m} dei punti 1 e 2 rispetto alla massa M. Utilizzando un commutatore non indicato nei precedenti schemi è poi possibile invertire il segnale presente nel canale B; scegliendo infine la modalità di funzionamento A+B, viene visualizzato il segnale $v_{1m} - v_{2m} = v_{12}$ di interesse.

Per quanto riguarda l'accuratezza del risultato ottenuto, si deve tener presente che l'introduzione di un qualsiasi blocco funzionale è senz'altro sorgente di incertezza. In questo caso, infatti, l'accuratezza della misura dipende principalmente dal CMRR del blocco invertitore-sommatore, il quale si comporta complessivamente come un amplificatore differenziale; in particolare, si deve ricordare che tale parametro diminuisce all'aumentare della frequenza dei segnali di ingresso.

6 Sonde per il prelievamento dei segnali

Generalmente per inviare all'ingresso dell'oscilloscopio il segnale da visualizzare vengono utilizzati dei connettori di tipo *BNC*; la tensione viene inoltre considerata rispetto a un riferimento comune, costituito di solito dalla massa dello strumento.

Ogni ingresso può essere schematizzato in termini equivalenti mediante un circuito formato da una resistenza R_1 e una capacità C_1 connesse tra loro in parallelo; la resistenza e la capacità di ingresso assumono tipicamente valori dell'ordine di alcuni $M\Omega$ e di alcune decine di pF rispettivamente.

Un valore elevato di resistenza di ingresso consente di evitare l'effetto di carico sul segnale da visualizzare quando tale segnale ha un contenuto spettrale rilevante solo a basse frequenze.

Quando invece il segnale da analizzare presenta, componenti significative in un ampio campo di frequenze, la capacità presente all'ingresso dell'oscilloscopio, offrendo una reattanza

dipendente dalla frequenza, può causare una distorsione del segnale prelevato; la traccia visualizzata sullo schermo non rappresenta quindi il segnale desiderato.

La resistenza di ingresso influenza invece le componenti del segnale a frequenza molto elevata. Per tali componenti, infatti, il tratto di cavo utilizzato per portare il segnale dal circuito sotto test al connettore di ingresso dell'oscilloscopio deve essere visto come una linea elettrica a costanti distribuite. Si verificano quindi delle riflessioni, il cui valore è funzione della resistenza interna del generatore di segnale, dell'impedenza caratteristica della linea e della resistenza di ingresso dell'oscilloscopio. Per evitare queste riflessioni si deve fare in modo da ottenere un adattamento delle varie impedenze interessate; in particolare, la resistenza di ingresso R_I dell'oscilloscopio dovrebbe coincidere con l'impedenza caratteristica del cavo di collegamento, il cui valore è generalmente compreso fra 50 e 100 Ω circa. Un valore così piccolo di resistenza di ingresso, però, pur evitando le riflessioni delle componenti ad alta frequenza, causa un rilevante effetto di carico alle componenti a bassa frequenza, con possibilità di alterazione del funzionamento del circuito che genera il segnale.

Si ricorda in particolare che un segnale prelevato da un circuito elettronico digitale, a causa delle veloci transizioni presentate, ha uno spettro molto ampio; una sua analisi mediante oscilloscopio richiede quindi particolari accorgimenti.

Una grossolana schematizzazione del circuito costituito dalla connessione del cavo e dell'oscilloscopio è riportata in Fig. 13.

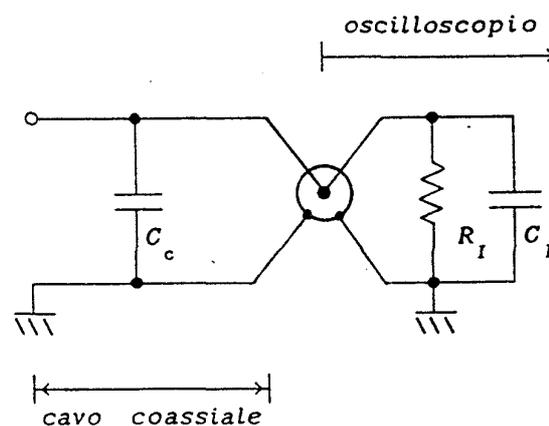


Fig. 13. Circuito equivalente di ingresso di un oscilloscopio.

Lo schema equivalente del cavo contiene solamente la capacità C_C , la quale viene a trovarsi in parallelo alla capacità di ingresso C_I dell'oscilloscopio. In prima approssimazione è infatti possibile trascurare la resistenza del cavo in quanto esso ha un lunghezza generalmente

limitata (circa 1-1,5 m) ed è realizzato con conduttori metallici. Si fa presente che spesso si ha $C_C \gg C_I$; a causa della capacità presentata dal cavo di collegamento, pertanto, la distorsione dei segnale di ingresso dovuta alla capacità può subire un notevole aumento.

Per ovviare almeno parzialmente a questi inconvenienti vengono utilizzate delle sonde compensate, il cui schema elettrico equivalente è riportato in Fig. 14. Per facilitare il prelevamento della tensione da visualizzare, tale sonda presenta a una estremità due terminali, uno dei quali deve essere collegato al morsetto di riferimento dei potenziali del circuito sotto test. Per facilitare il collegamento con l'oscilloscopio, l'altra estremità della sonda è formata invece da un cavo coassiale dotato di un connettore di tipo BNC. All'interno essa presenta inoltre una resistenza R_S e una capacità variabile C_S , mediante le quali è possibile ottenere la compensazione desiderata.

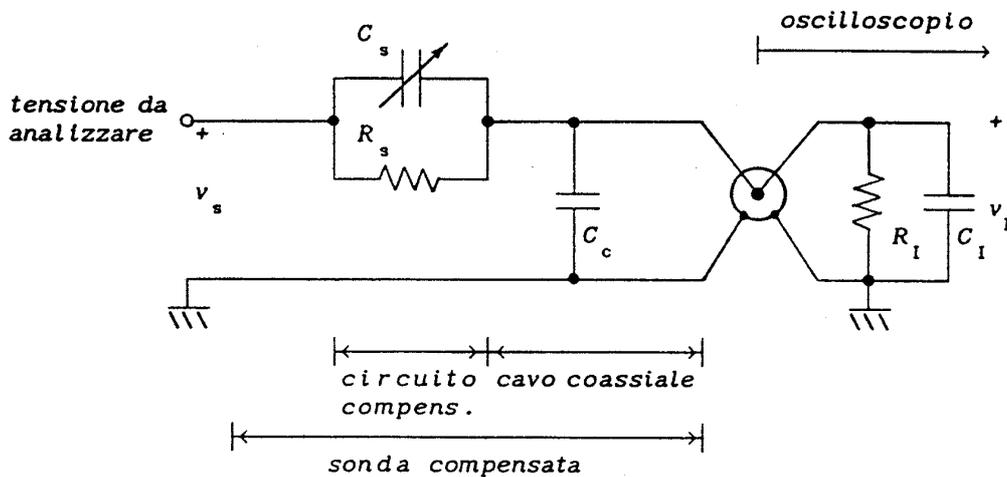


Fig. 14. Impiego di una sonda compensata.

Indicando con C_p il parallelo delle capacità C_C e C_I , il legame fra la tensione v_I all'ingresso dell'oscilloscopio e la tensione v_s da analizzare è dato dalla seguente relazione (avendo fatto in modo che $R_S C_S = R_I C_P$):

$$V_I = V_S R_I / (R_S + R_I)$$

nella quale non compare la variabile frequenza; in questo caso, quindi, la tensione visualizzata dall'oscilloscopio è proporzionale a V_S , indipendentemente dal suo contenuto spettrale.

Molto spesso si pone $R_S = 9 R_I$; si ottiene in tal modo una attenuazione pari a 10. Inoltre il circuito sotto test vede complessivamente una resistenza di carico molto elevata ($10 R_I$) con in parallelo una capacità molto piccola.

In pratica, per compensare una sonda, ossia per soddisfare la condizione $R_S C_S = R_I C_P$, viene generalmente utilizzato un segnale a onda quadra, quasi sempre fornito dall'oscilloscopio stesso. Per ottenere la compensazione si agisce su C_S fino a quando sullo schermo non viene visualizzata un'onda quadra.

Ogniqualvolta si cambia sonda oppure oscilloscopio, è buona norma procedere alla compensazione della sonda stessa.

Le sonde che sono state considerate finora sono di tipo passivo. Esistono però anche delle sonde attive, le quali sono caratterizzate da una resistenza R_S molto elevata e da una piccola capacità. C_S ; queste sono pertanto molto adatte ai casi in cui il generatore di segnale presenta una impedenza molto elevata. Le sonde attive consentono inoltre un facile adattamento a strumenti con impedenza di ingresso molto diverse tra loro, ad esempio con $R_I = 50 \Omega$, oppure $R_I = 1 \text{ M}\Omega$.