



LEZIONE # 9

Condotto a conclusione lo studio sistematico delle principali qualità metrologiche degli strumenti, viene ora affrontato lo studio di alcune delle nozioni e degli elementi fondamentali, sia concettuali sia propriamente circuitali, che si ritrovano nei vari stadi di una catena di misura.



A questo punto sembrerebbe logico procedere iniziando lo studio dal primo blocco, avviando una rassegna dei principali trasduttori utilizzati nell'industria meccanica o, più in generale, per l'ingegneria meccanica. Solamente per motivi didattici, si preferisce invece iniziare la descrizione partendo dall'ultimo stadio della catena di misura, ovvero dagli *strumenti terminali*. Nel campo dell'ingegneria sono stati utilizzati molti tipi diversi di visualizzatori per porgere all'operatore il valore numerico della misura; dai semplici indicatori ad ago collegati, per esempio, a degli ingranaggi che amplificano uno spostamento troppo piccolo per essere apprezzato bene ad occhio nudo, al menisco di una colonnina di fluido che può rappresentare una variazione di temperatura o di pressione. Oggi però, con la diffusione pressoché totale degli strumenti elettrici ed elettronici, assumono importanza fondamentale gli *strumenti terminali elettrici*.

Come evidenziato nello schema logico di sopra, in ambito industriale, la catena di misura è oramai quasi sempre elettrica ovvero, già al livello del trasduttore si ottiene in uscita una tensione o una corrente elettrica da inviare per l'elaborazione negli stadi successivi. La schiacciante superiorità degli strumenti elettrici ed elettronici nelle utilizzazioni industriali ha origine da tutta una serie di motivi tecnici (oltre che economici):

1. i trasduttori elettrici possono essere quasi sempre miniaturizzati.
2. vengono eliminati gli effetti di tutte quelle masse in movimento che, in qualche modo, avrebbero dovuto trasferire l'informazione dal luogo della misura al luogo della sua interpretazione.
3. è facile manipolare il segnale elettrico secondo le necessità: esso può essere amplificato, filtrato, sommato o sottratto ad altri segnali, e ancora derivato o integrato ...
4. è facile inviare il segnale elettrico che trasporta l'informazione a distanze anche ragguardevoli, ad esempio dalla linea di produzione alla sala controlli centralizzata, dove può essere convenientemente analizzato e registrato.
5. il segnale elettrico che proviene dalla misura, convenientemente manipolato, può essere usato in tempo reale per il controllo automatico dei processi di produzione.

Nonostante le moltissime forme nelle quali sono prodotti e venduti, per quanto attiene al principio di funzionamento, gli strumenti terminali elettrici industriali possono essere tutti ricondotti a tre sole classi, rappresentate dagli strumenti seguenti:

- il *galvanometro a bobina mobile*
- l'*oscilloscopio* (analogico)
- il *voltmetro digitale* (cui appartiene anche l'oscilloscopio digitale)



Del **galvanometro** si è già detto a proposito degli strumenti del 2° ordine e, appare utile aggiungere che, con l'inserimento in serie alla sua resistenza interna di una resistenza aggiuntiva di valore opportuno (elevato), esso può divenire, entro certi limiti, anche un misuratore di tensione.

L'**oscilloscopio analogico** è uno strumento terminale che permette di *visualizzare* in tempo reale *la forma dell'onda* che costituisce il segnale della misura. Avendo letteralmente la possibilità di "vedere" su di un piccolo monitor l'onda che rappresenta la grandezza in esame in funzione del tempo, risulta possibile, ad esempio, valutare immediatamente se la forma del segnale è distorta, qual è l'ampiezza dell'onda, quale il periodo e, nel caso dello studio comparativo di due segnali, anche lo sfasamento tra di essi.

Giova chiarire subito che, sebbene sia stato classificato come *strumento terminale* di una catena di misura, l'oscilloscopio è uno strumento a "se stante" che accetta all'ingresso segnali in tensione. Se il segnale in ingresso è periodico, lo strumento è capace di visualizzare in uscita la forma d'onda "ferma" sullo schermo.

L'equipaggio mobile dell'oscilloscopio analogico è costituito da un fascetto collimato di elettroni, generato all'interno del tubo a raggi catodici (Cathode Ray Tube).

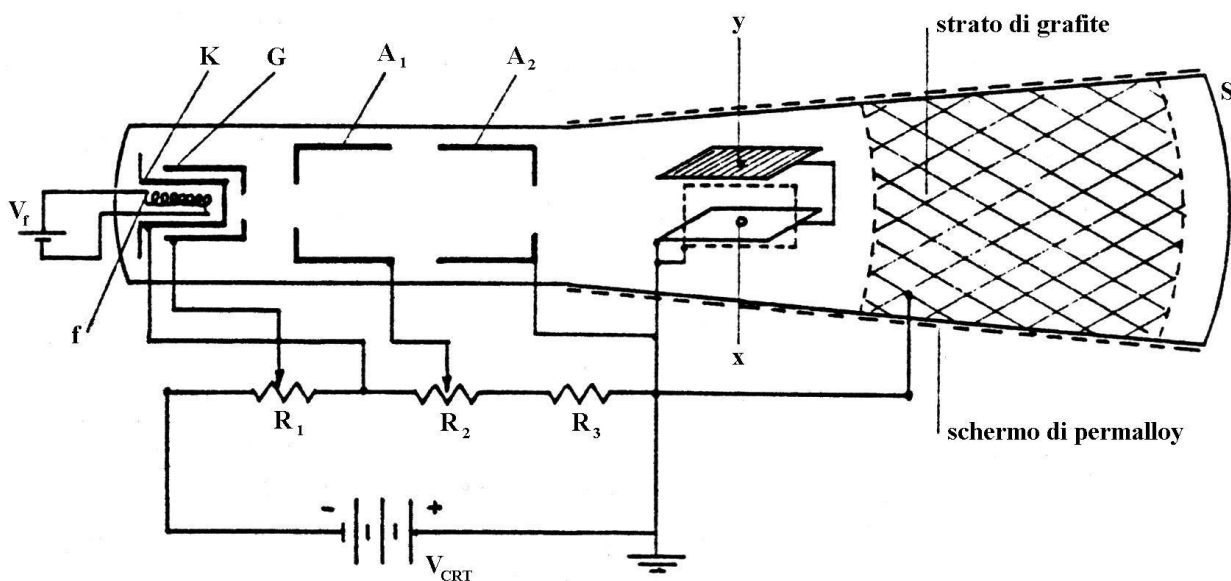


Figura 9.1

Il tubo a raggi catodici (CRT) è un tubo di vetro a simmetria cilindrica, la cui forma è schematizzata in figura 9.1 e all'interno del quale viene fatto il vuoto. Questo per consentire agli elettroni, che sono generati ad uno dei suoi estremi, di percorrere il loro cammino senza urtare continuamente con le molecole d'aria ovvero, senza perdere energia cinetica e soprattutto senza deviare dalla traiettoria voluta.

Il filamento f , alimentato da V_f , viene portato a incandescenza e la sua temperatura sale fino a 900°C circa, scaldando l'intorno. Il filamento è racchiuso nel catodo K . Questo è un cilindretto di nichel il cui fondo è ricoperto di metalli alcalino-terrosi i quali, portati alla giusta temperatura, hanno facilità ad emettere elettroni. La temperatura del catodo è regolata proprio attraverso l'intensità di corrente che viene fatta scorrere nel filamento f .

Gli elettroni sono attirati dagli anodi A_1 e A_2 i quali si trovano a potenziale più alto (positivo) rispetto al catodo K . Prima di giungere agli anodi, gli elettroni devono però superare l'ostacolo posto dalla griglia G . Come si riconosce dallo schema in figura, il potenziale della griglia è più basso (negativo) rispetto a quello del catodo e può essere regolato dall'esterno attraverso il potenziometro R_1 . La regolazione di R_1 permette il passaggio solamente di una parte del flusso di elettroni prodotto dal catodo K e, in ultima analisi, controlla la quantità di elettroni che andranno a formare il fascetto e che, una volta focalizzato, riuscirà ad impattare sullo schermo S cosparso di fosfori all'estremo opposto del tubo. Al limite, la regolazione di R_1 può interdire del tutto il passaggio degli elettroni verso destra "spegnendo" il fascetto.

Gli anodi A_1 e A_2 hanno il doppio ufficio di *accelerare* verso lo schermo e *focalizzare* gli elettroni per la formazione definitiva del fascetto collimato.

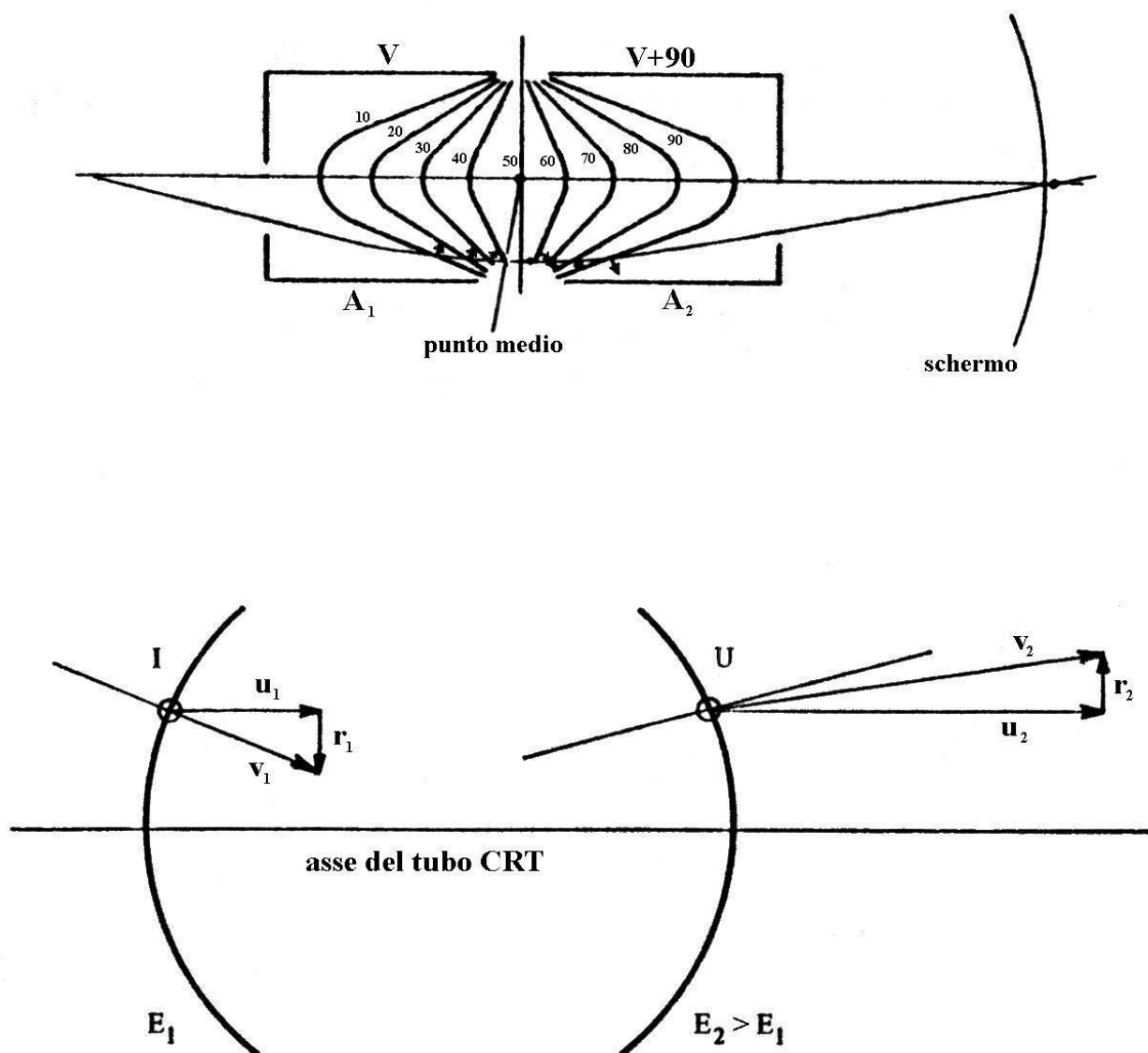


Figura 9.2

In virtù dei potenziali ad essi applicati (buona parte della V_{CRT}), gli anodi A_1 e A_2 formano al loro interno delle superfici equipotenziali (V e $V+90$ in figura 9.2) a simmetria cilindrica (nel piano della figura 9.2 sono rappresentate le linee speculari rispetto al punto medio). Essendo tali superfici a



potenziali sempre più alti (positivi) il loro primo effetto è certamente quello di attirare verso destra gli elettroni e^- quindi di accelerare il moto del fascetto stesso verso lo schermo.

Ma anche la focalizzazione degli elettroni avviene in virtù della simmetria delle linee equipotenziali del campo elettrico interno agli anodi. In ogni punto di attraversamento di due superfici simmetriche (linee I ed U in figura 9.2) l'azione attrattiva del campo sugli elettroni si esplica lungo le direzioni perpendicolari alle superfici. Per due punti di attraversamento, come quelli indicati in figura 9.2, che siano alla stessa distanza dall'asse del tubo CRT si riconosce come, a causa dell'effetto del campo, le componenti radiali della velocità r_1 ed r_2 impresse all'elettrone siano eguali ed opposte. Nel passaggio da I ad U è però aumentata la componente assiale della velocità da u_1 ad u_2 . Ne consegue che la *divergenza* impressa all'elettrone in corrispondenza della superficie U è minore della *convergenza* impressa in corrispondenza della superficie I.

Una attenta progettazione della geometria degli anodi e delle superfici equipotenziali ad essi interne consente di ottenere in uscita un fascetto collimato composto da un treno continuo di elettroni. Una volta usciti dagli anodi, gli elettroni non subiscono più alcuna accelerazione assiale. Se non intervenisse qualche altra *causa di disturbo*, il fascetto collimato così costituito andrebbe a concludere la sua corsa esattamente sul punto centrale dello schermo fluorescente.

Due coppie di placchette deflettrici hanno il compito finale di deviare in maniera coordinata il fascetto di elettroni dalla traiettoria assiale secondo le direzioni x ed y. Il segnale V_y in ingresso allo strumento viene inviato alle placchette orizzontali per ottenere la deflessione verticale. Il compito di deflettere orizzontalmente il medesimo fascetto di elettroni spetta alle placchette verticali. Se si desidera visualizzare il segnale esterno in funzione del tempo, alle placchette verticali viene applicato un segnale generato internamente all'oscilloscopio da un circuito elettronico apposito: il *generatore di dente di sega*. Se invece si desidera visualizzare due segnali uno in funzione dell'altro $y = f(x)$ è possibile escludere il circuito interno del dente di sega, inviare alle placchette verticali il segnale $x = x(t)$ ed alle placchette orizzontali il segnale $y = y(t)$. Questa tecnica produce la modalità di visualizzazione così detta "xy" (vedi seguito).

Le placchette deflettrici operano una *deflessione elettrostatica* degli elettroni che transitano al loro interno. Non è l'unica modalità di deflessione possibile, ad essa si affianca la modalità di *deflessione elettrodinamica* degli elettroni, ottenuta facendo transitare il fascetto di elettroni attraverso il campo elettromagnetico generato da due coppie di bobine. Fatto cenno alle diverse modalità di deflessione, dovute essenzialmente alle scelte tecniche dei costruttori di oscilloscopi, lo sviluppo dei concetti fondamentali è del tutto analogo per ambedue i casi e conduce alla valutazione della *sensibilità intrinseca* e della *rapidità* dello strumento visualizzatore oscilloscopio analogico.

Facendo riferimento sotto alla figura 9.3, si concentri ora l'attenzione su quello che accade ad ogni singolo elettrone una volta che esso ha abbandonato gli anodi che lo hanno accelerato verso lo schermo fluorescente e focalizzato entro un fascetto ben collimato.

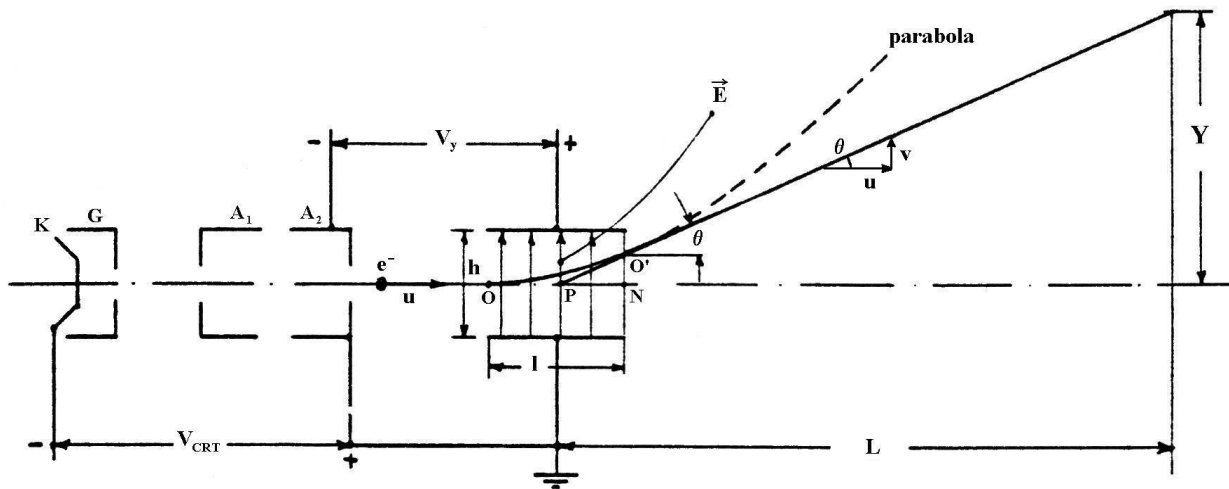


Figura 9.3

L'elettrone e^- , appartenente al fascetto focalizzato, arriva all'ingresso O delle placchette deflettrici orizzontali con una velocità u solamente assiale.

Alle placchette è applicato il segnale V_y che produce nella zona ON compresa tra le due placchette distanti h un campo elettrico di intensità: $|\vec{E}| = \frac{V_y}{h}$

Non appena l'elettrone e^- supera il punto d'ingresso O, esso è sottoposto ad un campo di forze:

$$\vec{F} = e^- \cdot \vec{E} \text{ diretto come il campo elettrico e di intensità: } F = e^- \cdot E = e^- \cdot \frac{V_y}{h}$$

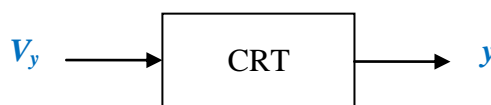
Questo campo di forze agisce per tutto il tempo che l'elettrone impiega ad attraversare lo spazio $ON = l$ compreso tra le placchette: $t = \frac{l}{u}$ (essendo la velocità assiale $u = \frac{l}{t}$)

L'elettrone subisce quindi un'accelerazione verticale: $a_v = \frac{F}{m} = \frac{e^- V_y}{mh}$ dove m è la massa

dell'elettrone, ed acquista quindi una velocità verticale: $v = a \cdot t = \frac{e^- V_y \cdot l}{mh \cdot u}$

Non appena l'elettrone abbandona la zona ON compresa tra le placchette orizzontali, cessa l'azione del campo di forze verticali e l'elettrone continua la sua corsa indisturbato fino ad impattare contro lo schermo fluorescente in un punto distante Y dall'asse del CRT.

Si rifletta un istante sul fatto che il tubo a raggi catodici CRT è il "cuore" dello strumento oscilloscopio, esso accetta in ingresso una tensione V_y e fornisce in uscita sullo schermo S una deflessione y :



si è quindi interessati a valutare la **sensibilità** dello strumento: $S = \frac{dy}{di} = \frac{dy}{dV_y}$



Per un segnale non infinitesimo V_y , la deflessione totale vale $Y = L \cdot \operatorname{tg} \theta$ essendo anche $\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{u}$ (vedi ancora figura 9.3)

$$\text{risulta allora per } Y = L \cdot \frac{v}{u} = L \cdot \frac{e^{-} V_y l}{m h u} \cdot \frac{1}{V_y} = \frac{L e^{-} V_y l}{m h u^2}$$

$$\text{e per la sensibilità } S = \frac{Y}{V_y} = \frac{L e^{-} V_y l}{m h u^2} \cdot \frac{1}{V_y} = \frac{L e^{-} l}{m h u^2}$$

che, come si vede, non dipende da V_y (intensità dell'ingresso). Questa circostanza da sola già denuncia il fatto che l'oscilloscopio è uno *strumento lineare*.

A partire dall'istante in cui l'elettrone abbandona gli anodi A_1 e A_2 , vale il *teorema di conservazione dell'energia in senso longitudinale* (lungo l'asse z del CRT) e si ha che l'energia cinetica acquistata dall'elettrone è eguale all'energia potenziale ceduta dagli anodi prima di entrare

nella zona di azione delle placchette deflettrici: $\frac{1}{2} m u^2 = e^{-} \cdot V_{CRT}$

$$\text{e per la sensibilità risulta infine: } S = \frac{e^{-} L l}{2 h e^{-} V_{CRT}} = \frac{L l}{2 h V_{CRT}}$$

che dipende solamente da parametri costruttivi del tubo CRT e dalla tensione di accelerazione assiale degli elettroni V_{CRT} .

esempio: si valuti la sensibilità di un oscilloscopio che ha i dati costruttivi seguenti

$$l = 1 \text{ cm}$$

$$h = 0.2 \text{ cm}$$

$$L = 20 \text{ cm}$$

$$V_{CRT} = 5 \text{ kV}$$

$$S = \frac{20 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}}{2 \times 0.2 \text{ cm} \times 5000 \text{ V}} = 0.1 \text{ mm/V} \quad \text{è piccolissima !}$$

con una sensibilità intrinseca così bassa, per poter realmente "vedere" la deflessione del fascetto di elettroni sullo schermo, l'oscilloscopio richiede che il segnale in ingresso V_y venga fortemente amplificato prima di essere inviato alle placchette deflettrici.

Per studiare la *rapidità* è possibile fare riferimento al tempo netto che l'elettrone impiega per transitare attraverso le placchette, ovvero al tempo in cui l'elettrone è soggetto al campo delle forze deflettrici.

Dalla legge di conservazione dell'energia in senso assiale $\frac{1}{2} m u^2 = e^{-} \cdot V_{CRT}$ si ricava la velocità

$$\text{assiale degli elettroni: } u = \sqrt{\frac{2 e^{-} V_{CRT}}{m}}$$

$$\text{quindi, il tempo di transito risulta: } t = \frac{l}{u} = l \sqrt{\frac{m}{2 e^{-} V_{CRT}}}$$

esempio: il tempo di transito per l'oscilloscopio dell'esempio precedente con



$$e^- = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$
$$m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$t = 1 \text{ cm} \sqrt{\frac{9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}{2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 5000 \text{ V}}} = 10^{-10} \text{ s} = 0.1 \text{ ns} \quad \text{è piccolissimo !}$$

Si rifletta ora sulla circostanza seguente: se il segnale V_y ha il periodo della propria frequenza massima eguale a 10 volte il tempo di percorrenza appena calcolato, questo garantisce che l'elettrone durante il transito tra le placchette sia esposto ad un campo di forze originato da un segnale di tensione praticamente costante quindi, la deflessione Y in uscita risulta direttamente proporzionale a V_y , senza distorsioni di forma. Ma un periodo pari a 10 volte il tempo di percorrenza significa $T_{min} = 1 \text{ ns}$ che in termini di massima frequenza ammissibile del segnale V_y significa f_{max} dell'ordine di 1 GHz . In base a quanto appena osservato, non dovrebbe essere difficile convincersi che gli oscilloscopi sono tra gli strumenti analogici più rapidi che si possano avere a disposizione. Si osservi ancora una volta la *proporzionalità inversa* tra *sensibilità* e *banda passante*. Si consideri anche che per frequenze di taglio così elevate diventa importante che l'oscilloscopio sia equipaggiato con amplificatori velocissimi, che abbiano un *tempo di salita* (slew rate) dell'ordine di 10^{-10} secondi, ovvero comparabile con il tempo di transito degli elettroni sotto alle placchette.

Si è già detto che quando si vuole avere sullo schermo dell'oscilloscopio una rappresentazione di V_y in funzione del tempo, il segnale V_x da applicare alle placchette verticali per avere la deflessione orizzontale del fascetto di elettroni viene prodotto internamente all'oscilloscopio da un apposito circuito elettronico, il *generatore di denti di sega*: $v_x(t) = Kt - V_x$

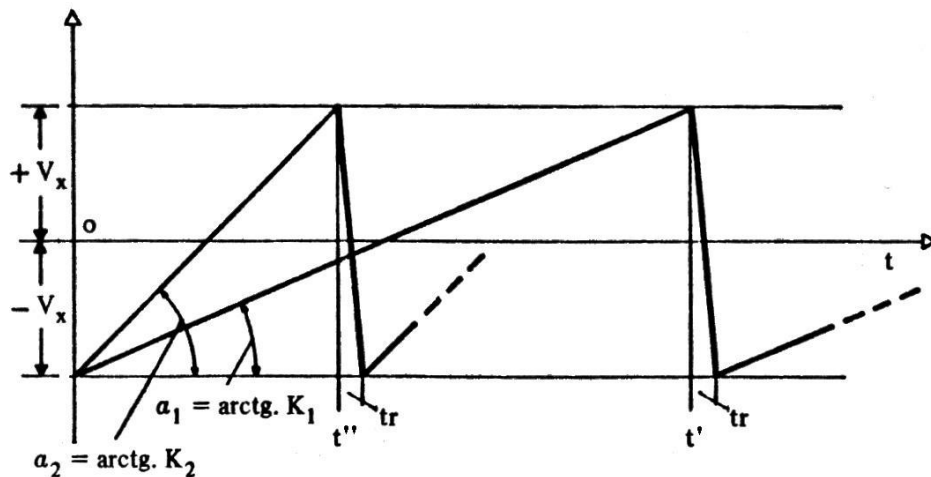


Figura 9.4

si tratta di una serie continua di *rampe di tensione* di periodo T regolabile dall'operatore che si estendono da un valore minimo $-V_x$ ad uno massimo di $+V_x$. Con t_r si è indicato il *tempo di ritorno* impiegato dal generatore di denti di sega a riportare il segnale v_x al punto di partenza. Ai fini pratici t_r non dà luogo ad alcuna visualizzazione, dura pochi punti % del periodo T e può essere trascurato. Al tempo $t = T/2$ risulta $v_x(t) = 0$ ovvero il pennello elettronico si trova in corrispondenza del centro dello schermo (asse x). Essendo $K \cdot T/2 - V_x = 0$ esso vi transita con velocità proporzionale a $K = 2V_x/T$ espressa in $[\text{V}][\text{s}^{-1}]$. Il coefficiente K rappresenta la velocità di variazione della



tensione v_x applicata alle placchette verticali. Si osservi nella figura 9.4 che passare da K_1 a $K_2 > K_1$ significa diminuire il periodo $T'' < T'$ del dente di sega. Sullo schermo dello strumento compare però direttamente la lettura del tempo in ms/div o anche in $\mu s/div$. Più è alto il valore di K è più piccolo è l'intervallo di tempo assegnato alla divisione orizzontale dello schermo.

La composizione del segnale dello schermo avviene applicando contemporaneamente il dente di sega alle placchette verticali (asse x) ed il segnale periodico V_y alle placchette orizzontali (asse y) come indicato schematicamente sotto nella figura 9.5. Si osservi che la condizione necessaria per visualizzare una forma d'onda *intera e ferma* sullo schermo è avere il periodo del dente di sega T coincidente col periodo T_y del segnale in ingresso V_y .

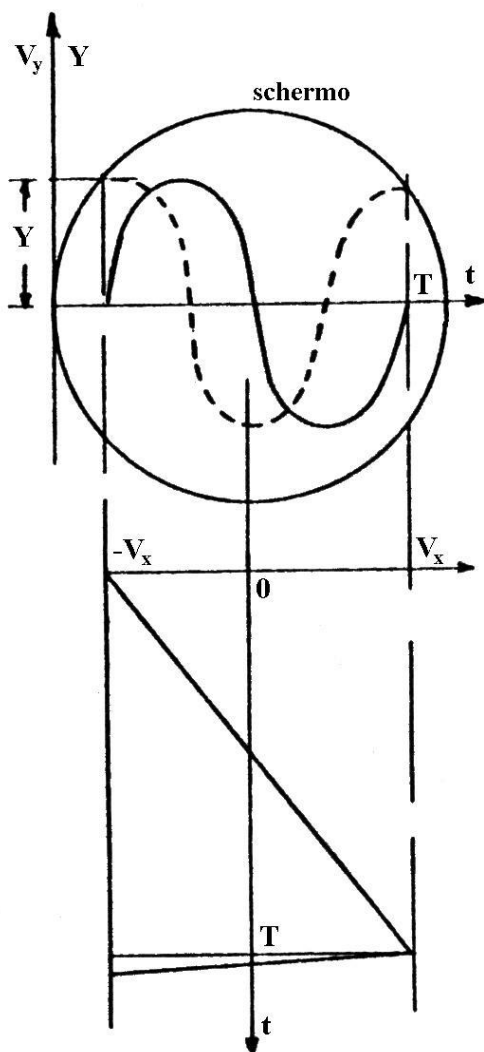


Figura 9.5

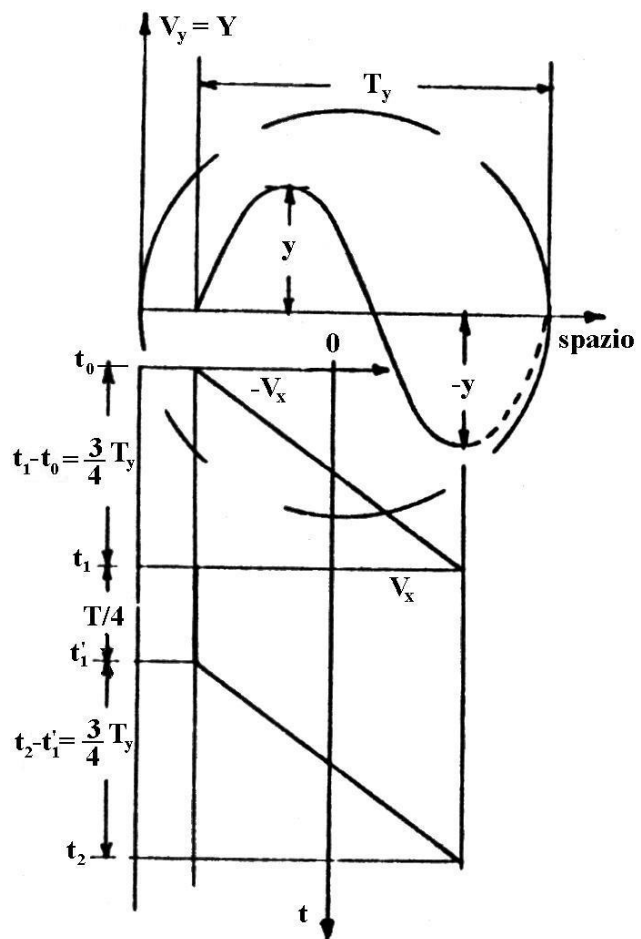


Figura 9.6

Se i due periodi non fossero coincidenti, come nel caso a destra in figura 9.6, dove il periodo del dente di sega è $T_x = t_1 - t_0 = \frac{3}{4} T_y$, un apposito circuito elettronico dell'oscilloscopio è in grado di *sincronizzare* la partenza di ogni rampa con un punto preciso del segnale periodico (ad es. $V_y=0$) ovvero di mettere in attesa la rampa successiva per il tempo che il segnale in ingresso impiega per concludere ciò che rimane del periodo dell'onda ($T/4$ in figura).



In questo modo è possibile visualizzare ferme sullo schermo *frazioni* di forme d'onda o anche multipli non interi di onde periodiche.

Per la visualizzazione in **modalità xy** il segnale $v_x(t)$ del generatore di denti di sega viene scollegato per mezzo di un selettore dalle placchette verticali e ad esse viene inviato dall'esterno un secondo segnale in tensione V_x in modo da ottenere una "deflessione combinata" del fascetto secondo la legge $Y=f(X)$. Con la modalità di funzionamento xy è possibile visualizzare sullo schermo di uscita l'evoluzione nel tempo di esperimenti nei quali esiste una dipendenza funzionale tra due grandezze misurate (ad esempio un ciclo di isteresi $B=f(H)$ o la legge di Hook $\sigma=E \cdot \varepsilon$).

Uno schema a blocchi completo di un oscilloscopio analogico è riportato nella figura 9.7 seguente:

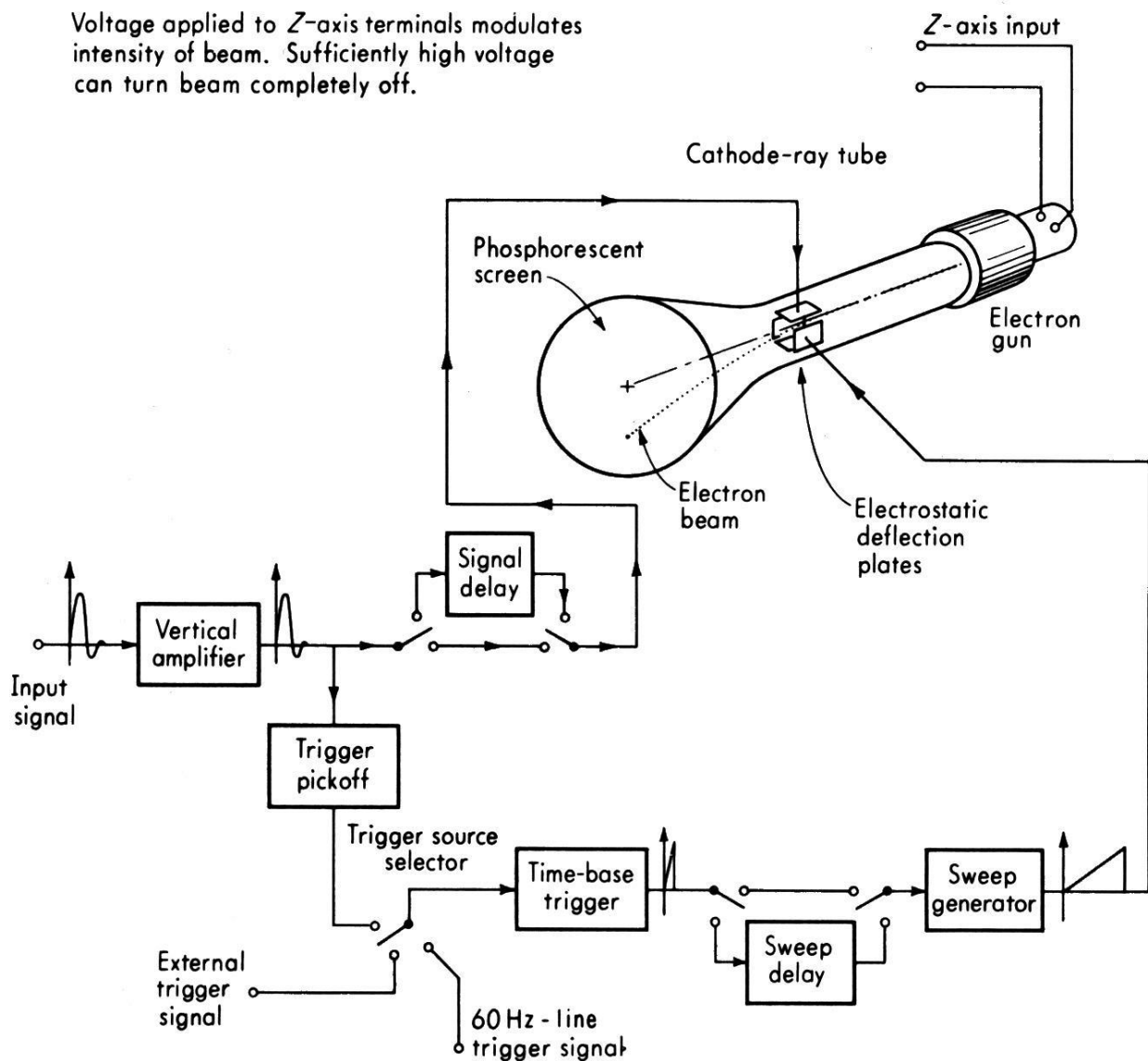


Figura 9.7



Per l'**oscilloscopio digitale** basti dire che, per quanto attiene l'elaborazione del segnale in ingresso, esso è concettualmente molto più vicino ad un voltmetro digitale che non all'oscilloscopio analogico. In uscita si ottiene sempre la visualizzazione delle forma d'onda su di uno schermo ma, si tratta di un'onda ricostruita per mezzo dei campioni digitalizzati. Lo schermo dell'oscilloscopio digitale quindi è concettualmente molto più simile ad un monitor di computer che non ad un tubo CRT con le placchette deflettrici alle quali viene applicato direttamente il segnale in tensione. Le modalità di conversione analogico-digitale (A/D) di un segnale in tensione saranno accennate nel seguito assieme alle qualità metrologiche fondamentali dei dispositivi atti ad eseguire tale operazione.

Uno schema a blocchi di un moderno oscilloscopio digitale a 4 canali è riportato a titolo d'esempio nella figura 9.8 seguente:

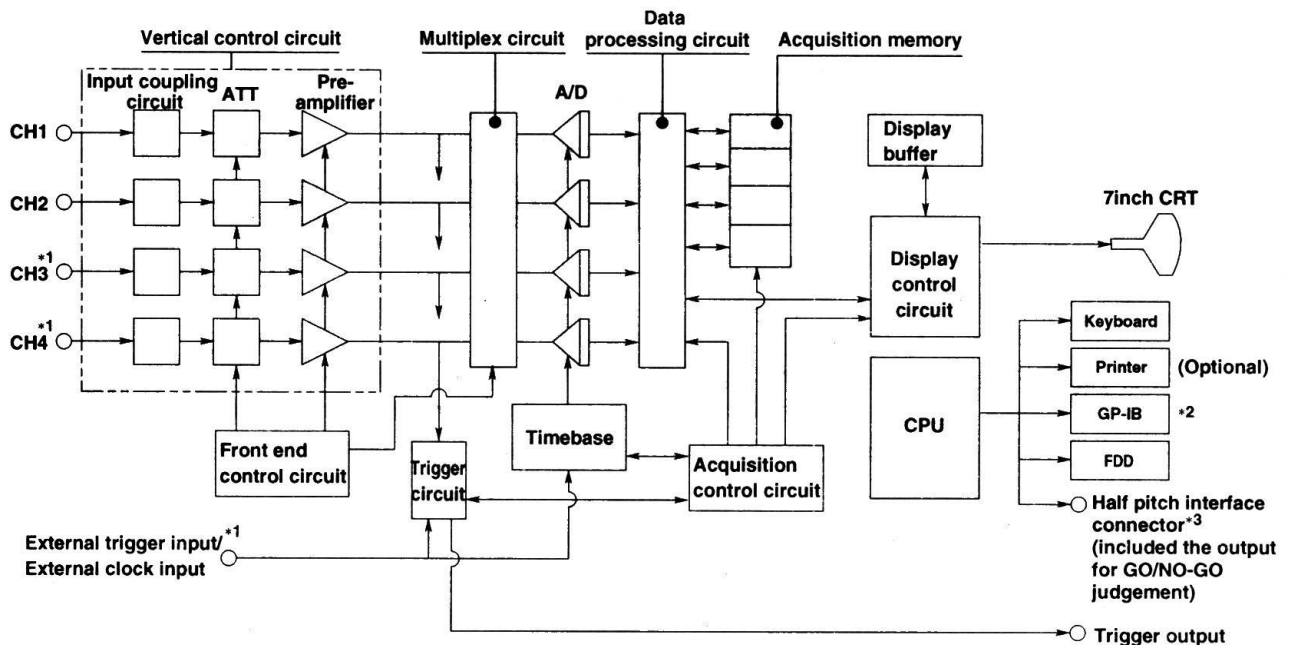


Figura 9.8

Note:

Figure 9.1; 9.2; 9.3; 9.4; 9.5; 9.6 courtesy of:
Branca F.P. – *Misure Meccaniche* – ed. ESA

Figure 9.7 courtesy of:
Doebelin E.O. – *Measurement systems, application and design* – McGraw Hill

Figure 9.8 courtesy of:
Yokogawa Electric Corporation