

dove si riconoscono i contributi dei vari termini che sono legati rispettivamente alle incertezze relative all'area dell'impulso, al rapporto delle resistenze, al conteggio e alla stabilità del clock.

Per ridurre i primi due contributi sono richiesti:

1. impulsi calibrati e fortemente stabili;
2. elevata precisione sul rapporto  $R_1/R_2$ .

Gli ultimi due contributi riguardano la misura diretta di frequenza e sono, rispettivamente, l'incertezza di quantizzazione e l'incertezza sulla base dei tempi.

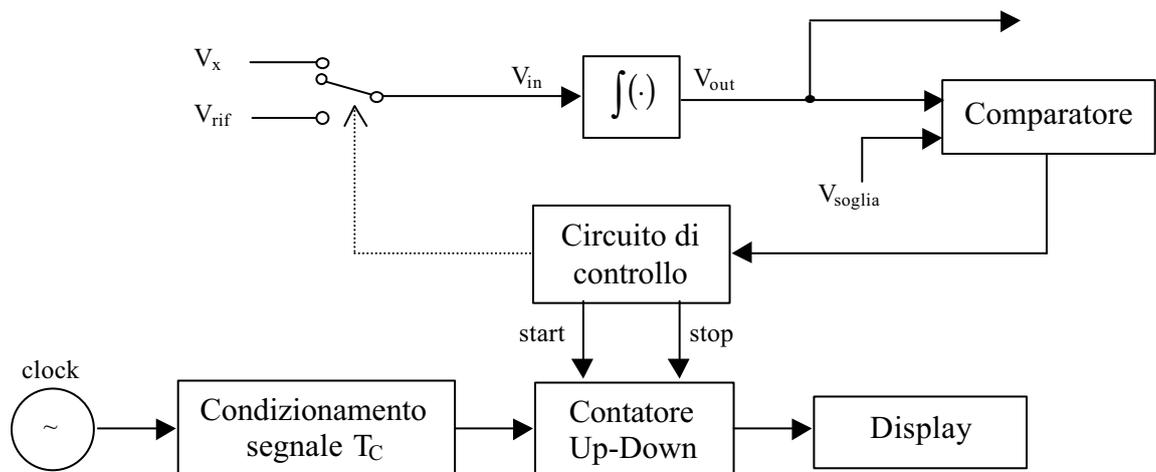
Per ridurre l'incertezza legata a questi contributi è richiesto:

1. un tempo di misurazione sufficientemente lungo;
2. un clock molto stabile.

È, altresì, richiesta la costanza del valore sia del rapporto  $R_1/R_2$  sia della capacità, almeno durante la misurazione (stabilità a breve termine).

### **Voltmetro a doppia rampa (a conversione tensione-tempo)**

Il voltmetro a doppia rampa è una soluzione di misura circuitalmente più complessa del voltmetro a semplice integrazione, che può garantire prestazioni migliori in quanto l'incertezza di misura non dipende dall'area dell'impulso e dal rapporto delle resistenze.



- figura 5.10 -

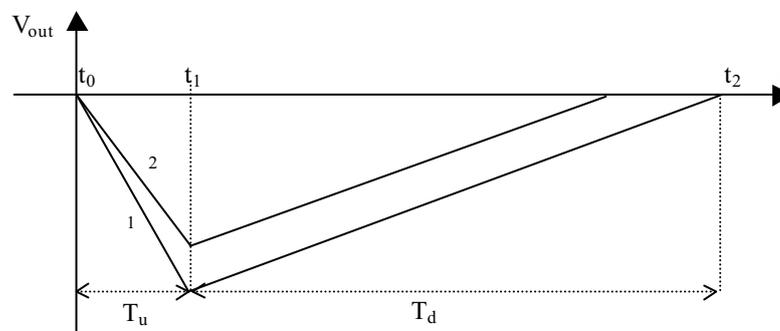
In relazione alla figura 5.10,  $V_x$  è una tensione continua e positiva, e  $V_{rif}$  è una tensione di riferimento generata internamente allo strumento e di segno opposto al misurando. Il commutatore, pilotato da un circuito di controllo, seleziona la tensione da integrare. L'uscita del blocco di integrazione viene comparata con una tensione  $V_{soglia}$  posta al potenziale zero, preso come riferimento. L'uscita del comparatore va in ingresso al circuito di controllo, che determina, oltre al segnale con cui si pilota l'interruttore, i due istanti di *start* e di *stop* fra i quali è abilitato il conteggio.

In figura 5.11 è rappresentato il comportamento dell'uscita dell'integratore  $V_{out}$  al variare del tempo, nell'ipotesi che essa sia inizialmente nulla.

All'istante iniziale  $t_0$  il commutatore seleziona la tensione continua  $V_x$  da inviare in ingresso all'integratore (si faccia riferimento, per semplicità, alla figura 5.9). In virtù della configurazione invertente dell'amplificatore operazionale l'andamento di  $V_{out}$  è una rampa decrescente che termina in  $t_1$ , istante stabilito in fase di progettazione. L'intervallo di integrazione  $T_u = t_1 - t_0$  è chiamato "tempo di up", ed è il tempo di carica del condensatore. In questo modo la carica accumulata nel condensatore è proporzionale alla  $V_x$ .

All'istante  $t_1$  il circuito di controllo permette la commutazione dell'interruttore per l'integrazione della  $V_{rif}$  e abilita l'inizio dei conteggi mediante il comando di start. Il conteggio dura il tempo necessario, detto "tempo di down" ( $T_d = t_2 - t_1$ ), alla rampa per raggiungere il valore zero nell'istante  $t_2$ . Il comparatore fornisce al circuito di controllo il segnale per l'abilitazione dello stop al conteggio. Sono, dunque, contati solo i conteggi appartenenti all'intervallo  $T_d$ .

È bene osservare che in questa fase, che corrisponde alla scarica del condensatore, la rampa assume pendenza opposta alla fase precedente a causa del segno opposto tra  $V_x$  e  $V_{rif}$ .



- figura 5.11 -

Le fasi di carica e scarica del condensatore avvengono con la stessa costante di tempo  $RC$  e la tensione ai capi del condensatore fino all'istante  $t_1$  dipende solo da

$V_x$ ; ad essa è imputabile la pendenza del tratto tra  $t_0$  e  $t_1$ : se la  $V_x$  diminuisce anche la pendenza del segmento "1" diminuisce e la carica avviene con andamento rappresentato dal segmento "2"; viceversa, quando la  $V_x$  aumenta la pendenza aumenta.

Il nome di "convertitore tensione-tempo" deriva dalla considerazione che la durata  $T_d$  della fase di scarica dipende solo dalla  $V_x$ , essendo costante la pendenza della rampa. Ogni variazione del misurando si ripercuote, quindi, in una variazione di  $T_d$  e, di conseguenza, in un diverso numero di conteggi attraverso i quali si risale a  $V_x$ .

Analiticamente risulta:

$$\int_{T_u} V_x dt + \int_{T_d} V_{rif} dt = 0$$

$$V_x T_u = |V_{rif}| T_d \Rightarrow V_x = |V_{rif}| \frac{T_d}{T_u} \quad (5.7)$$

Si osservi che i valori di  $V_{rif}$  e  $T_u$  sono noti come pure il loro rapporto; per valutare  $V_x$  occorre, quindi, solo misurare  $T_d$ .

Occorre, ancora, osservare che la costante di proporzionalità tra il misurando e la grandezza effettivamente misurata per il voltmetro a semplice integrazione è l'area dell'impulso, mentre nel voltmetro a doppia rampa è una tensione; ciò rende gradita questa soluzione circuitale perché è più semplice garantire la stabilità della sola tensione piuttosto che quella di un'area che è data dal prodotto di una tensione per un tempo.

Il tempo  $T_u$  è scelto pari ad un multiplo intero di periodi di clock ed è valida la relazione:

$$T_u = N \cdot T_c \quad (5.8)$$

dove  $T_c$  è il periodo di clock.

Per migliorare la sincronizzazione tra i due conteggi relativi alla fase di up e a quella di down, e contenere così l'errore di quantizzazione, si usa un *contatore up-down* che è in grado di incrementare e decrementare il numero di conteggi. Questo contatore viene caricato, all'inizio della misurazione, con il numero intero  $N_u$  tale che risulti  $T_u = N_u T_c$ . Con il procedere della misurazione, questo numero viene decrementato fino ad annullarsi proprio all'istante  $t_1$ , che rappresenta la fine del primo processo di integrazione e l'inizio del secondo. Con l'inizio della seconda fase di integrazione il contatore svolge la sua fase up incrementando conteggi. In questo

modo l'istante  $t_1$  è esattamente sincronizzato con l'inizio di un periodo di clock. Ciò consente di ottenere che:

$$N_d T_c \leq T_D \leq (N_d + 1) T_c \quad (5.9)$$

condizione sicuramente più vantaggiosa di  $(N_d - 1) T_c \leq T_D \leq (N_d + 1) T_c$  che risulta in assenza di sincronizzazione.

Si può inoltre scrivere:

$$V_x = |V_{rif}| \frac{N_d T_c}{N_u T_c} \quad (5.10)$$

che evidenzia la dipendenza della misura della tensione incognita dal rapporto dei conteggi.

In ipotesi di stabilità del segnale generato dall'oscillatore di riferimento, almeno nel tempo di misurazione (stabilità *a breve termine*), è lecito semplificare  $T_c$ , per cui la costante di proporzionalità è pari alla sola  $|V_{rif}|$ . Si osservi che l'ipotesi precedente porta ad una condizione di stabilità molto più debole di quella della soluzione precedente, dove l'incertezza è riferita ad una stabilità a lungo termine della base dei tempi.

Viene infine richiesta anche una stabilità a breve termine sia di  $R_1$  sia di  $C$ .

### Risoluzione e tempo di misura

La risoluzione, fissata in fase di progettazione dello strumento, può anche essere scritta come:

$$\Delta V = \frac{V_{rif}}{N_u} = \frac{V_x}{N_d} = \frac{FS}{N_{dmax}} \quad (5.11)$$

dove FS è il valore della tensione di fondo scala.

L'ultima uguaglianza tiene conto del fatto che la relazione è vera anche quando in ingresso allo strumento è applicata la tensione di fondo scala, in corrispondenza della quale si osservano il maggior numero di conteggi ( $N_{dmax}$ ).

Pertanto, fissati il fondo scala ed il numero massimo di conteggi, risulta determinato il valore della risoluzione.

Il tempo di misura  $T_{mis}$  dello strumento è dato dalla relazione:

$$T_{mis} = (N_u + N_d) \cdot T_c \quad (5.12)$$

Per esprimere il tempo di misura in funzione della risoluzione, si può scrivere:

$$T_{mis} = \left[ \frac{V_{rif} \cdot N_{dmax}}{FS} + \frac{V_x \cdot N_{dmax}}{FS} \right] \cdot T_c = \left[ \frac{V_{rif}}{FS} + \frac{V_x}{FS} \right] \cdot T_c N_{dmax} \quad (5.13)$$

Il caso peggiore, ossia il tempo più elevato, è rappresentato da  $V_x=FS$ . In queste condizioni:

$$(T_{mis})_{max} = \left[ \frac{V_{rif}}{FS} + 1 \right] \cdot T_c N_{dmax} \quad (5.14)$$

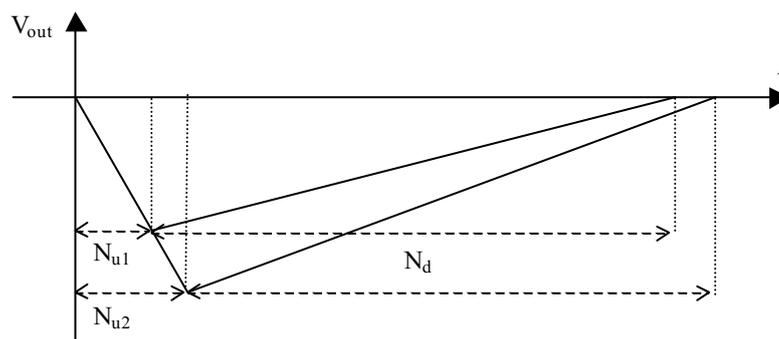
e, una volta fissati i parametri di progetto, risulta essere, praticamente, una costante.

La possibilità di ridurre il tempo di misura massimo senza peggiorare la risoluzione è legato alla sola  $V_{rif}$ , ma impone che si operi contemporaneamente anche su  $N_u$  per mantenere costante il loro rapporto e, dunque, la risoluzione.

Ridurre la fase di up mantenendo inalterata  $N_d$  significa, inoltre, ridurre le pendenze delle rampe nella fase di scarica (figura 5.12).

Nello specifico la scelta di ridurre  $V_{rif}$  comporta due tipologie di problemi:

1. il tempo di integrazione del segnale di ingresso diminuisce, con relativa riduzione dell'efficacia di uno dei maggiori benefici dei voltmetri ad integrazione: la reiezione del rumore presente sul misurando;
2. la difficoltà per il comparatore di rilevare il passaggio per lo zero avvenuta al diminuire della pendenza nella fase di down; si crea incertezza sulla determinazione dello zero, che aggiunge incertezza sulla misura di  $T_d$ .



- figura 5.12 -

Si preferisce, quindi, non variare la tensione di riferimento, anzi renderla proprio pari ad  $FS$ , e trovare invece soluzioni progettuali alternative. Dalle scelte fatte segue che:

$$(T_{mis})_{max} = 2T_c N_{dmax} = 2T_c \frac{FS}{\Delta V} \quad (5.15)$$