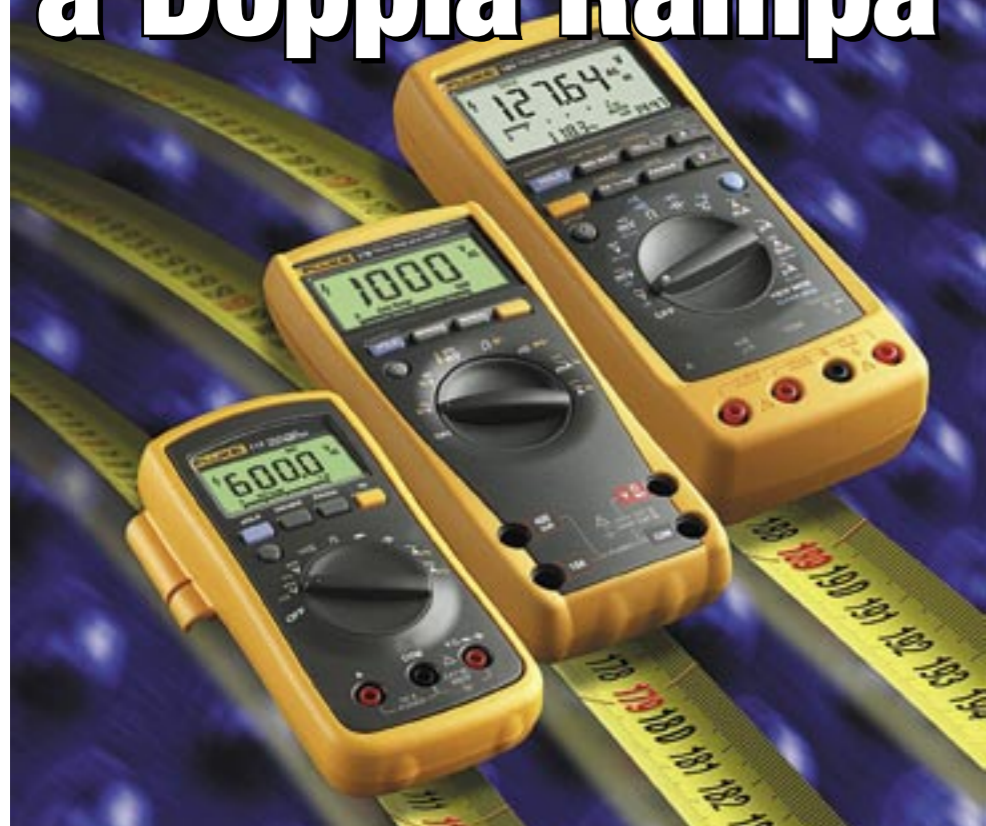


# Convertitore a Doppia Rampa



**Continuiamo con la serie di articoli dedicati alla strumentazione elettronica. Nel numero precedente abbiamo visto il funzionamento del convertitore tensione/frequenza. In questo articolo affrontiamo il comportamento di un altro rilevatore di tensioni continue: il convertitore a doppia rampa**

a cura di Flavio Criseo

Dallo studio del convertitore tensione/frequenza, abbiamo potuto vedere come si rileva una tensione continua (in particolare modo, come si rileva il suo valore medio) e, in seguito, come la si converte in modo digitale.

Il convertitore tensione/frequenza è, a tutti gli effetti, un convertitore capace di trasformare un segnale analogico in ingresso in un segnale digitale in uscita.

Appare chiaro come lo strumento di misura visto nel numero precedente (vedi "Il Cinescopio" di ottobre a pag. 80) sia un ADC (Analogic Digital Converter). Nell'articolo precedente, ciò non è stato specificato volontariamente, proprio per indurre i lettori ad abituarsi a una "mentalità" più riflessiva dopo

averne letto il funzionamento. Nei prossimi articoli tratteremo l'argomento degli ADC più complessi e precisi, ma per poterli comprendere meglio studieremo ora un altro convertitore: "Il Doppia Rampa".

## Perché si chiama così

Il circuito elettronico presente in Fig. 1 è spesso denominato Doppia Rampa, ma non di rado è chiamato anche Convertitore Tensione/Tempo.

Confrontando lo schema del convertitore tensione/frequenza, (visibile nell'articolo pubblicato sul numero di ottobre a pag. 81) con la Fig. 1 è possibile notare come siano presenti delle parti

simili, mentre altre sono totalmente nuove.

Le parti uguali sono:

1. Circuito integratore di ingresso;
2. Comparatore senza isteresi;
3. Gate logico di comando.

La presenza del circuito integratore in ingresso ci fa intuire che anche questo strumento di lettura esegue un rilevamento del valore medio della tensione applicata al suo ingresso.

Grazie all'azione di integrazione, è eliminato il Ripple presente in ingresso (il ripple che è normalmente dato dalla tensione di rete).

Vedremo di seguito come questo nuovo circuito presenta un numero maggiore di pregi rispetto al conver-

titore tensione/frequenza. Per questo motivo è molto usato anche nelle apparecchiature di alta precisione (multimetri portatili, da banco, ecc.).

La sua sensibilità e/o incertezza nelle misure è data da due fattori importanti:

1. dall'integratore presente in ingresso (Offset tipico degli Op-Amp);
2. dal comparatore che si interfaccia con il gate di controllo (anche qui l'Offset tipico degli Op-Amp dà qualche problema).

L'Offset di per se stesso è un problema; è sufficiente impiegare un Op-Amp per strumentazione avente dei pin appositi, per la correzione dell'offset, oppure basta sottrarre questa tensione indesiderata dalla lettura effettuata (questo vale per il comparatore, mentre per l'integratore l'Offset deve essere corretto prima dell'azione integrale).

La Fig. 1 mostra la presenza di un controller che ricevendo il clock (CK), il valore di tensione dal comparatore e il comando OL dal contatore ad n-bit, decide quando pilotare il MUX presente in ingresso allo strumento e quando avviare il conteggio del contatore stesso.

Il controller può essere realizzato con semplice rete combinatoria (ovvero da un circuito logico formato da più gate), oppure, come accade spesso nei multimetri da banco, è un controllore capace di gestire porte ingresso-uscita (I/O) secondo l'algoritmo di programmazione presente al suo interno.

Così com'era presente nel convertitore tensione/frequenza, anche in questo strumento si ha una tensione di riferimento -E.

Vediamo in che modo la sua presenza sia utile e quanto sia importante la sua precisione.

## Azione integrale

Quando in ingresso abbiamo la presenza di una tensione  $V_i$ , il controller invia il comando di preset (in linea di massima sarebbe più corretto indicare tale comando come un comando d'Enable ma, in qualsiasi caso, il funzionamento non cambierebbe) al contatore che ricevendo il bit di inizio conteggio comincia a contare.

Il conteggio è altresì vincolato dal gate presente a un altro ingresso del contatore stesso (vedi Fig. 1).

La porta AND comanda il tempo di conteggio.

Per tutto il tempo che il gate darà 1 in uscita, il contatore continuerà a contare all'infinito.

Dato che uno dei pin di ingresso dell'AND è connesso al clock CK e in particolar modo che questo impulso di clock ha la durata di 20 msec o un sottomultiplo di essa (per gli stessi motivi visti nel convertitore tensione/frequenza) sappiamo che il tempo  $T_c$  (tempo di clock) sarà per l'appunto di 20 msec (o un suo sottomultiplo).

Se all'altro pin dell'AND è presente livello logico 1, il nostro gate avrà uscita 1 per un tempo pari a  $T_c$  (20 msec).

In questa situazione il contatore binario conterà un certo numero di bit (chiamiamoli  $N'$ ).

Guardando lo schema è possibile vedere che il contatore presenta un pin di uscita denominato OL.

Il suo livello logico dipende dal conteggio e serve al controller per sapere quando il contatore ha raggiunto un conteggio ben preciso.

Il termine OL spesso assume il significato d'Over-Load (sovraccarico) nel nostro caso, però, indica la condizione d'Over-Flow (ovvero quando si è raggiunta una certa configurazione binaria all'interno del contatore).

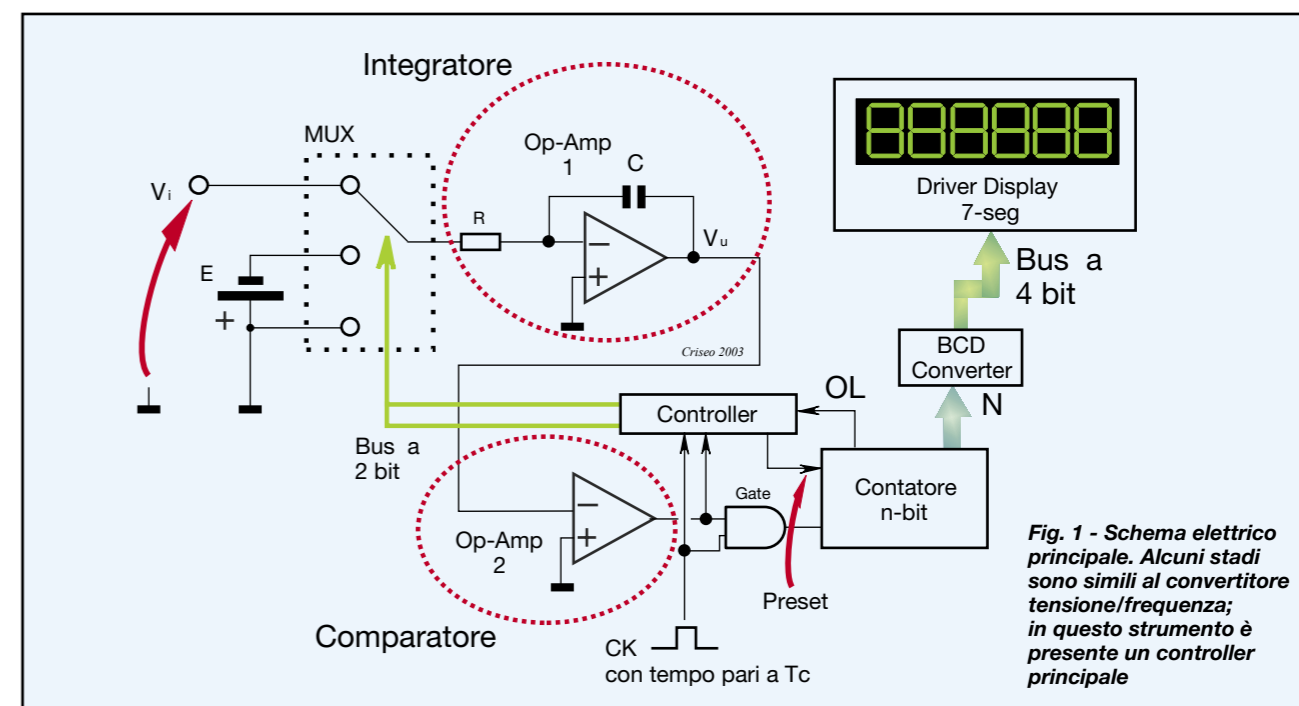
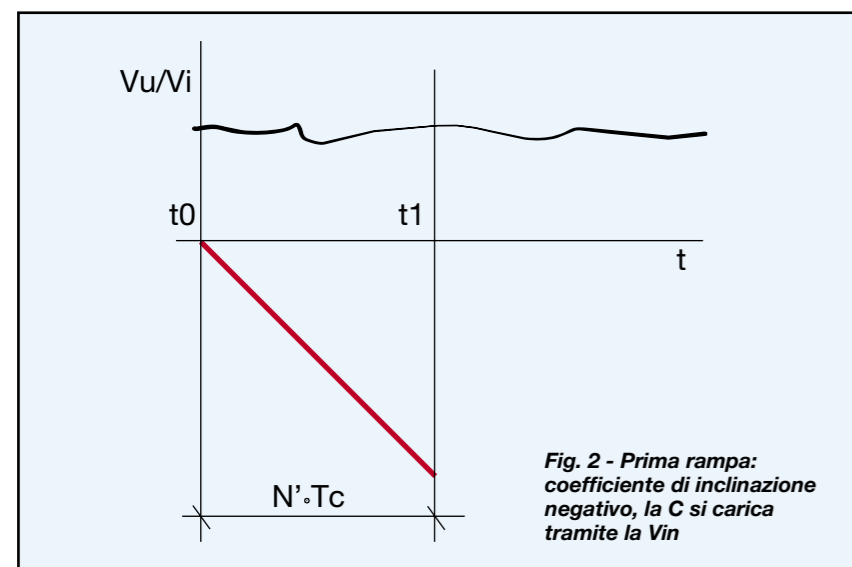


Fig. 1 - Schema elettrico principale. Alcuni stadi sono simili al convertitore tensione/frequenza; in questo strumento è presente un controller principale



Riassumiamo brevemente

Sappiamo che il comando OL giunge al controller dopo un certo tempo; se per il tempo  $T_c$  il contatore ha contato fino a un numero  $N'$ , vuol dire che avremo  $OL = N' \cdot T_c$ .

Entro tutto questo tempo l'integratore all'ingresso dello strumento carica il condensatore C, visibile in Fig. 1, con l'andamento in Fig. 2.

Quando il contatore setta a 1 il pin OL (ciò si verifica appena il contatore è arrivato a  $N'$ ) il controller, ricevendo tale livello logico, aziona il MUX.

Il mux, visibile in Fig. 1, commuta il selettore interno inserendo la batteria E connessa esternamente. Si noti come la batteria "E" è connessa con polarità opposta, quindi il pin di ingresso del mux riceve una tensione pari a  $-E$ . Siccome la "E" è negativa la carica di C avviene con una rampa opposta rispetto alla precedente.

Nella prima rampa (Fig. 2) il coefficiente di inclinazione della retta disegnata in rosso è negativo; questo ci consente di capire che se il condensatore era inizialmente scarico (questo è assicurato dal fatto che prima di effettuare una qualsiasi lettura, il controller setta il mux sulla terza posizione, come visibile in Fig. 1, C scarica a massa eventuali cariche residue) inizierà a caricarsi verso valori di tensione inferiori allo zero.

Guardando la Fig. 3, è possibile notare come il coefficiente di inclinazione sia positivo (andamento opposto al precedente), quindi il condensatore si carica verso valori di tensione positivi. Dato che C è caricato verso valori negativi, si nota che l'andamento di carica non è altro che una scarica del condensatore stesso, affinché si possa caricare successivamente a una tensione positiva.

La capacità C deve scaricarsi totalmente, passare per lo zero e quindi iniziare la carica con la giusta polarità.

Nella Fig. 2 è possibile notare come il condensatore C si carichi verso valori negativi di tensione (intervallo di tempo  $t_0, t_1$ ); nella

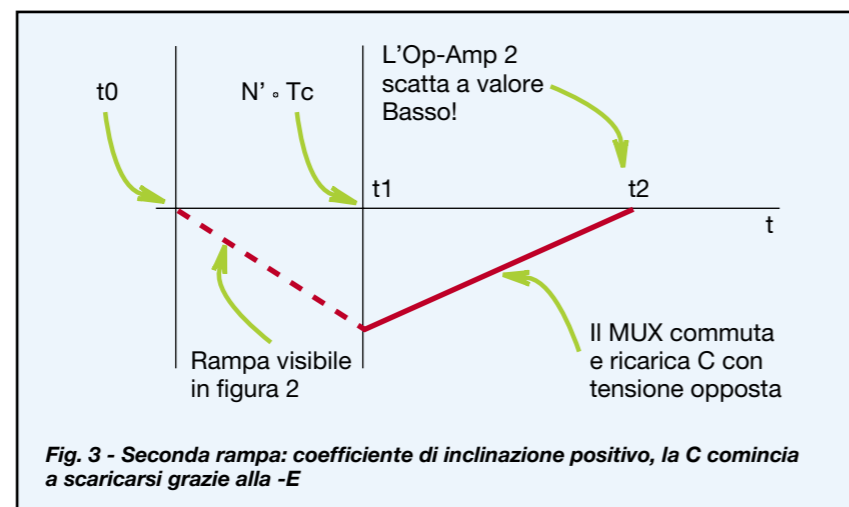


Fig. 3 è visibile come, a partire dall'istante di tempo  $t_1$ , il condensatore comincia a scaricarsi verso lo zero fino ad arrivare al tempo  $t_2$ . Da questo istante, il condensatore C può iniziare la sua carica verso valori positivi.

La carica di C verso valori di tensioni positivi non avviene mai (se non fino ad arrivare al potenziale zero). Questo è dato dalla presenza del secondo Op-Amp, visibile in Fig. 1.

La sua connessione consente di avere un dispositivo di comparazione tarato "sullo zero": poiché il pin Non invertente è connesso a massa, il pin Invertente viene comparato con questo potenziale di riferimento.

All'istante di tempo  $t_2$ , il comparatore "Op-Amp 2" scatta a valore "L" (Low) ovvero alla SAT- (tensione di saturazione negativa).

Per tutto il tempo precedente l'istante  $t_2$ , l'uscita dell'Op-Amp 2 è alta (ovvero SAT+), quindi l'operazione presenta livello logico 1 in uscita.

Nel convertitore tensione/frequenza, avevamo visto come si comportava il gate, vediamo ora com'è connesso il gate di questo circuito.

La porta logica controlla il contatore già visto. Sappiamo che la porta AND compie un'operazione di prodotto logico, la sua uscita sarà alta solamente quando entrambi gli ingressi avranno livello logico 1. Durante il duty-cycle del clock "CK" il pin del gate sarà 1.

Parallela, durante tutta la rampa fra  $t_1$  e  $t_2$  l'Op-Amp 2 sarà SAT+, quindi l'uscita sarà anch'essa "1".

In questa situazione, il contatore riceve lo start per il conteggio; tale conteggio darà come risultato un certo numero N.

Il tempo trascorso fra gli istanti  $t_1$  e  $t_2$  darà un valore pari a  $(t_2 - t_1) = N \cdot T_c$ .

Quando Op-Amp 2 scatta a valore basso il gate riceve all'ingresso il valore logico basso commutando a valore 0 l'uscita (si veda la Fig. 4), quindi il contatore arresta il suo conteggio.

Contemporaneamente, anche il controller riceve il valore logico basso, quindi il numero N che possiamo leggere è il numero di impulsi contati per compiere la risalita della rampa fino all'istante  $t_2$ .

In questo modo, conosciamo quanto tempo è necessario per la risalita della rampa.

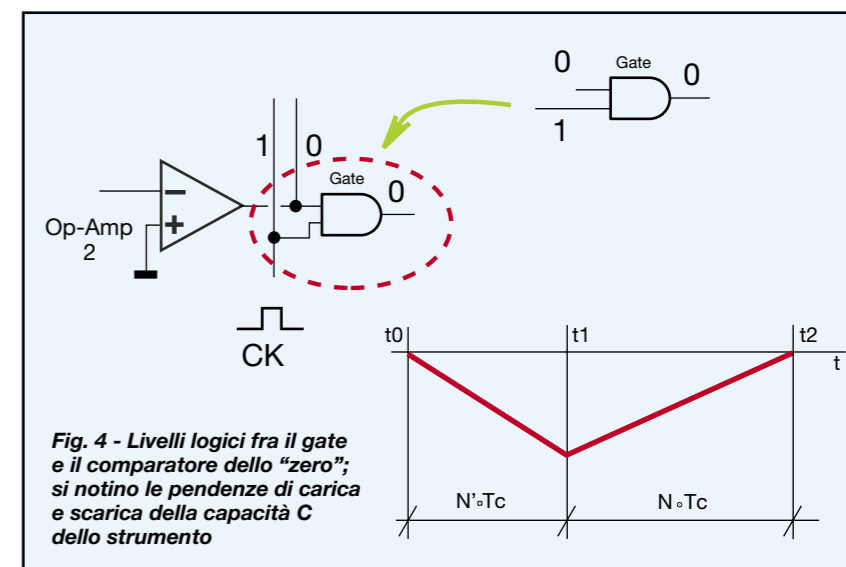
Ricapitoliamo

Ad un certo istante immettiamo una tensione positiva all'ingresso dello strumento; questa tensione viene integrata dall'integratore che carica il condensatore a valori di tensione negativi.

In questo intervallo di tempo il comparatore 2 è saturo; appena arriva il livello logico 1 sul pin CK, il gate comanda il conteggio fino al valore  $N'$ , dopodiché il comando OL comunica al controller che si è raggiunto tale valore di conteggio. A questo punto il controller commuta il mux in ingresso per far integrare a Op-Amp 1 la tensione negativa  $-E$  (e non più la tensione da misurare in ingresso allo strumento!).

L'integrazione continua finché, attraverso il gate, il comparatore 2 non blocca il conteggio. Contemporaneamente, anche il controller è informato dall'Op-Amp 2 che l'integrazione positiva deve finire; egli stesso provvede a "risettare" il mux alla posizione originaria.

A conteggio bloccato, il contatore avrà raggiunto un valore pari a un certo numero arbitrario N che, in seguito, sarà mandato al circuito di visualizzazione.



È importante notare che l'istante di tempo fra  $t_0$  e  $t_1$  è sempre lo stesso, questo perché il numero  $N'$  è un numero stabilito a priori in fase di progetto. La tensione in ingresso  $V_{in}$ , carica il condensatore dell'integratore sempre per un certo tempo stabilito.

Nonostante la costante di integrazione sia sempre la stessa (questo è vero perché il gruppo RC in ingresso è sempre lo stesso), quando la tensione da misurare in ingresso sarà diversa (rispetto alla tensione misurata in precedenza), la tensione di carica finale di C al tempo  $t_1$  sarà sempre diversa (abbiamo già detto invece che il tempo necessario alla carica sarà sempre lo stesso).

La fase di scarica del condensatore avrà sempre lo stesso coefficiente positivo (questo perché, oltre al fatto che RC sono sempre gli stessi, anche  $-E$  è sempre la stessa, dato che si tratta di un generatore di tensione di precisione interno allo strumento).

Se il coefficiente positivo di scarica sarà sempre lo stesso, vuol dire che per scaricarsi il condensatore impiegherà un tempo dipendente dal valore di tensione iniziale al quale è stato sottoposto.

Perché doppia rampa

Vediamo ora la Fig. 5. In questa figura è possibile vedere due doppie rampe: la prima doppia rampa

è raffigurata in giallo, mentre la seconda in rosso. Guardiamo la doppia rampa in giallo: nell'intervallo  $t_0-t_1$  il condensatore si carica fino a un certo valore negativo (istante  $t_1$ ); successivamente si scarica fino al tempo  $t_2$  (il contatore, in questo lasso di tempo, riuscirà a contare un certo numero N); quindi il numero N contato viene visualizzato.

Consideriamo ora la doppia rampa in rosso: nell'intervallo  $t_0-t_1$  il condensatore si caricherà con una f.e.m. (forza elettro motrice) maggiore (ammettiamo infatti che la tensione da misurare in ingresso sia di valore maggiore rispetto alla misura precedente), quindi nel tempo stabilito la tensione di carica sarà più negativa rispetto al caso precedente.

A partire dal tempo  $t_1$  inizia la scarica (data dall'inserzione della  $-E$  all'ingresso del mux) del condensatore.

La scarica di C avviene in un tempo maggiore rispetto al caso precedente proprio perché si è partiti da una tensione negativa di carica maggiore. Il tempo  $t_2'$  è il nuovo tempo che il dispositivo impiega a scaricare C; il conteggio effettuato dal contatore darà un certo numero N che però non sarà lo stesso numero N letto nella lettura precedente, proprio perché  $t_2'$  è diverso da  $t_2$ .

In questo caso si è messo in relazione una certa tensione con un certo numero di conteggio.



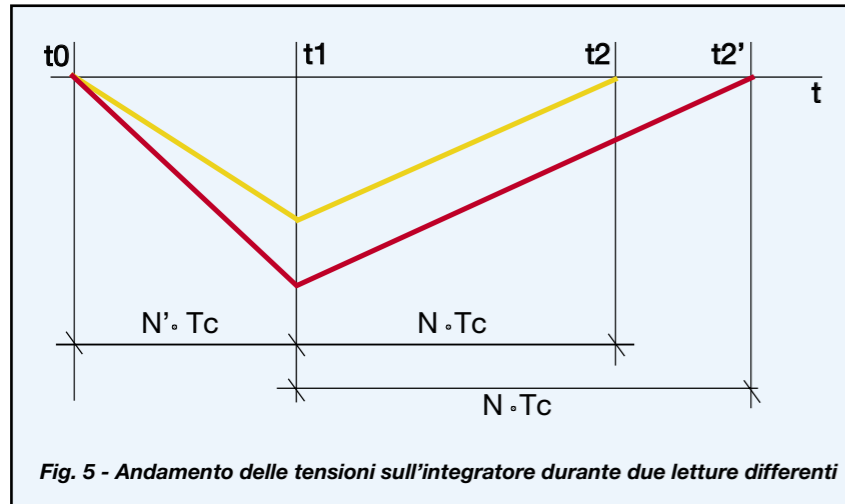


Fig. 5 - Andamento delle tensioni sull'integratore durante due letture differenti

In particolar modo, abbiamo convertito la tensione presente in ingresso in un determinato tempo di scarica del condensatore C (da qui il nome Tensione/Tempo).

**Pregi e difetti**

Come in tutti gli strumenti, anche questo convertitore presenta dei pregi e dei difetti. Innanzi tutto è bene tenere presente che l'azione integrale ci garantisce una certa riduzione del ripple dato dalla tensione di rete.

Dato che la tensione di rete ha una frequenza di 50 Hz, il suo periodo t sarà uguale a:

$$t = \frac{1}{50} = 20 \text{ msec};$$

questo tempo è un limite invalicabile per il contatore, quindi il campionatore è del tipo a "bassa velocità", ma aumentandone la frequenza  $f_c$ , con un multiplo dei 50 Hz, è possibile renderlo un po' più veloce.

Come abbiamo detto più volte negli articoli riguardanti i TVC, i numeri digitali sono numeri binari ovvero in base 2; il numero  $N'$  potrà essere al massimo  $2^n$ , pertanto avremo che:

$$N' = 2^n = N'_{\max}$$

Il tempo massimo possibile sarà quindi:

$$(t1 - t0)_{\max} = N'_{\max} \cdot T_c = 2^n \cdot T_c,$$

ma per il motivo visto prima anche:

$$N_{\max} = 2^n$$

quindi si avrà:

$$(t2 - t1)_{\max} = 2^n \cdot T_c = N_{\max} \cdot T_c.$$

Siccome la Doppia Rampa comprende tutti e due gli intervalli di tempo, avremo che:

$$(t2 - t0)_{\max} = 2^n \cdot T_c + 2^n \cdot T_c = 2^{n+1} \cdot T_c$$

(tempo massimo di conversione!).

Quale sarà la minima frequenza utile per la conversione?

Avendo calcolato il massimo tempo ammissibile per la conversione, possiamo sapere la minima frequenza utile:

$$f_{\min} = \frac{1}{2^{n+1} \cdot T_c}$$

Il termine

$$\frac{1}{T_c}$$

non è altro che la frequenza del clock CK! Quindi possiamo scrivere:

$$f_{\min} = \frac{f_c}{2^{n+1}};$$

si noti che se aumenta il numero "n" la frequenza massima diminuisce di conseguenza.

Ammettiamo di imporre un numero "n" pari a 4 e imponendo una frequenza di clock pari a  $f_c = 10 \text{ kHz}$  (ovvero un multiplo dei 50 Hz), avremo:

$$\Rightarrow f_{\max} = \frac{10 \text{ k}}{2^5} \approx 312 \text{ Hz}$$

ovvero possiamo far effettuare allo strumento circa 300 conversioni al secondo.

**Vediamo la misura della tensione**

Data la presenza dell'integratore, lo strumento esegue un rilevamento del valore medio della grandezza misurata.

Vediamo come è possibile rilevare la grandezza interessata e quali sono i calcoli che compie il circuito:

$$\text{A) } V_{\text{med}} = \int_{t_0}^{t_1} \frac{V_i(t)}{RC} dt$$

questo primo calcolo integrale mostra come la tensione di ingresso è elaborata dal circuito fra gli istanti  $t_0$  e  $t_1$ .

Successivamente, l'integrazione è effettuata sulla f.e.m. interna allo strumento pertanto:

$$\text{B) } \int_{t_1}^{t_2} \frac{E}{RC} dt$$

eguagliando i due termini appena visti si ha:

$$\text{C) } \int_{t_0}^{t_1} \frac{V_i(t)}{RC} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{E}{RC} dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{i(\text{med})} (t1 - t0) = E (t2 - t1)$$

ovvero:

$$\text{D) } V_{i(\text{med})} = \frac{E}{(t1 - t0)} (t2 - t1).$$

Abbiamo detto in precedenza che gli intervalli di tempo  $t1-t0$  e  $t2-t1$  sono anche esprimibili come  $N' \cdot T_c$  e  $N \cdot T_c$ ; l'equazione finale D) diviene:

$$\Rightarrow V_{i(\text{med})} = \frac{E}{N' \cdot T_c} N \cdot T_c,$$

siccome il termine  $T_c$  risulta essere presente sia al numeratore che al denominatore può essere tolto ottenendo quindi che:

$$\text{E) } V_{i(\text{med})} = \frac{E}{N'} N.$$

Dalla formula finale E) possiamo notare come la precisione

e la stabilità della tensione di riferimento E (interna allo strumento) sia fondamentale per la corretta lettura della  $V_{in}$  presente in ingresso.

Anche in questo strumento possono presentarsi problemi di deriva termica, nonché tutti i problemi dell'Offset degli Op-Amp.

È meno grave il problema del clock perché può essere reso preciso con un oscillatore quarzato, mentre l'errore di lettura causata da un'impresione del conteggio è di circa  $\pm$  un digit.

L'incertezza percentuale sul rilevamento voltmetrico è dato da:

$$\Delta V \% = \Delta E \% + \Delta N \%$$

Una variazione percentuale (se pur piccola) può influire negativamente sulla lettura effettuata.

Questo tipo di strumento è molto diffuso e molto preciso (tutti i difetti appena accennati possono essere contenuti con dovuti accorgimenti).

L'utilizzo di ADC di precisione è fondamentale per i rilevamenti di tensione laddove si richieda un'alta impedenza di ingresso (si pensi ai circuiti, ai MOS, oppure ai circuiti digitali in genere).

La R di ingresso all'Op-Amp può assumere valori che vanno da alcune centinaia di  $k\Omega$  ad alcune decine di  $M\Omega$ .

Quando si vogliono ottenere letture ancora più precise, ma soprattutto ben più veloci, si impiega un convertitore ad alte prestazioni che opera secondo una logica di funzionamento molto diversa: il Convertitore ad Approssimazioni Successive.

Ma questo dispositivo lo vedremo nella prossima trattazione. □