

# MISURE DI TEMPO E FREQUENZA CON IL CONTATORE NUMERICO

## 1. INTRODUZIONE

Una delle tecniche usate per convertire una grandezza analogica in un valore numerico è quella basata sul conteggio, condotto in un determinato intervallo di tempo, di una serie di impulsi opportunamente generati; tali tecniche vengono realizzate da dispositivi chiamati **contatori numerici**.

Il significato del risultato del conteggio dipende sia dall'origine degli impulsi contati, sia dalla durata dell'intervallo di tempo durante il quale è stato effettuato il conteggio. Scegliendo opportunamente questi due parametri, cioè l'origine degli impulsi da contare e la durata dell'intervallo di conteggio, si possono effettuare misurazioni di numerosi tipi di grandezze.

## 2. BLOCCHI FONDAMENTALI DI UN CONTATORE NUMERICO

In un contatore numerico sono presenti i seguenti blocchi funzionali fondamentali:

- blocco di ingresso;
- blocco porta o gate;
- base dei tempi e riferimento di frequenza;
- blocco di conteggio;
- blocco di visualizzazione.

Questi blocchi vengono fra loro collegati in maniera diversa a seconda del tipo di misurazione che si intende effettuare. E' il caso di precisare che alcune misurazioni non richiedono l'impiego di tutti i blocchi funzionali: in tal caso, alcuni di essi rimangono inutilizzati, sebbene presenti nello strumento.

Nei successivi paragrafi verranno illustrate le caratteristiche principali di ognuno di questi blocchi, soprattutto da un punto di vista funzionale. Verranno poi illustrate le principali misurazioni che è possibile effettuare utilizzando lo strumento così composto.

### 2.1 Il blocco di ingresso

Tale blocco esegue essenzialmente il condizionamento del segnale elettrico di ingresso in modo da renderlo adatto ad essere trattato dal successivo blocco funzionale; spesso, infatti, il segnale da analizzare è di tipo analogico, mentre i blocchi successivi richiedono un segnale di tipo impulsivo o caratterizzato da un livello logico definito.

Normalmente il blocco di ingresso comprende pertanto sia circuiti normalizzatori, sia circuiti formatori di segnale; mentre i primi realizzano le amplificazioni e/o le attenuazioni necessarie per adattare il segnale da misurare alla portata dello strumento, i secondi forniscono in uscita un segnale generalmente di tipo impulsivo o logico. I legami fra gli impulsi o i fronti del segnale logico in uscita e il segnale di ingresso dipendono essenzialmente dal tipo di misurazione che si vuole effettuare.

In una delle situazioni più tipiche, il blocco di ingresso agisce in maniera pressoché identica al circuito generatore del trigger in un oscilloscopio analogico: l'operatore fissa un livello di riferimento ed una pendenza del segnale d'ingresso mediante un comando esterno,

dopo di che il segnale di ingresso viene “squadrato” in base a tale livello ed alla pendenza posseduta. In alcune misurazioni lo strumento utilizza direttamente i fronti di salita e di discesa del segnale così ottenuto; in altri casi, viene impiegato un circuito derivatore per ottenere un impulso in corrispondenza di ogni fronte del segnale logico; possono poi essere eliminati gli impulsi positivi, oppure quelli negativi.

È inoltre normalmente disponibile sul pannello frontale un commutatore azionabile in modo manuale, che consente di inviare al blocco di ingresso il segnale da analizzare sia direttamente, sia mediante un condensatore posto in serie (collegamento AC/DC); ciò permette di bloccare l'eventuale componente continua del segnale quando questa non deve essere oggetto di misurazione.

## 2.2 Il blocco porta o gate

La funzione logica del blocco gate consiste nel discriminare fra gli impulsi forniti dal blocco di ingresso quelli che devono essere contati dal successivo blocco di conteggio. Il blocco gate presenta infatti due ingressi, uno per il segnale costituito dagli impulsi da contare e uno per il segnale di comando; gli impulsi da contare vengono inviati verso il successivo blocco di conteggio in funzione del valore assunto dal segnale presente all'ingresso di comando.

L'inizio e la fine del conteggio sono individuati mediante due opportuni segnali, di solito denominati rispettivamente comando di “start” (apertura della porta) e comando di “stop” (chiusura della porta); i comandi di apertura e chiusura del gate possono inoltre essere forniti sia dalla base dei tempi, sia dai circuiti di controllo, con modalità dipendenti dal tipo di misurazione. Nel seguito il blocco gate sarà indicato mediante lo schema logico riportato in fig. 1.

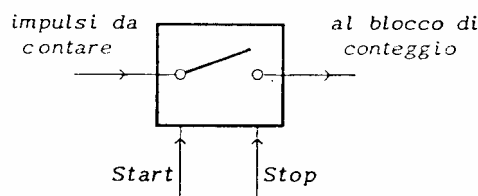


Fig. 1. Schema logico di un gate.

Il comando di start chiude logicamente l'interruttore, che rimane in tale posizione fino a quando il successivo segnale di stop non ne causa l'apertura.

Nella forma più semplice il blocco gate è formato da una semplice porta *AND*, come indicato in fig. 2. Il fronte di salita del segnale di comando abilita il passaggio attraverso la porta *AND* degli impulsi da contare e può quindi essere considerato il segnale di start; il successivo fronte di discesa pone termine all'intervallo di tempo durante il quale la porta è abilitata e costituisce pertanto il comando di stop.

Sono ovviamente possibili numerose altre soluzioni, che permettono una maggiore flessibilità nel comando di questo blocco. Si consideri, ad esempio, il circuito di fig. 3. In questo caso i segnali di start e di stop, oltre ad essere distinti, sono anche costituiti da impulsi poiché la memorizzazione del comando è ottenuta tramite un flip-flop (FF); si noti però che tale FF richiede una predisposizione iniziale, non indicata nello schema.

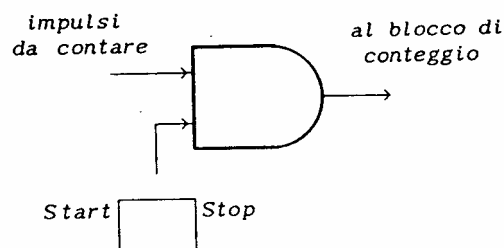


Fig. 2. Schema elementare di un blocco gate.

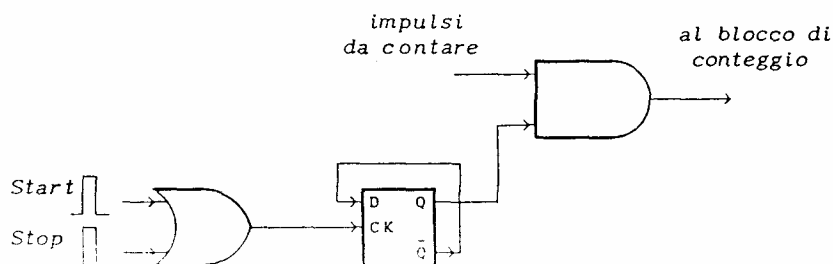


Fig. 3. Schema di un blocco gate con comandi separati di start e di stop.

### 2.3 La Base dei Tempi

Per misurare la durata di un intervallo di tempo, un contatore deve disporre di un riferimento temporale interno. Esso è ottenuto mediante un complesso di circuiti denominato “base dei tempi”; tale struttura produce un segnale con frequenza di riferimento  $F_R$  generato da un oscillatore interno e permette di ottenere segnali aventi frequenza  $F_C$  multipla o sottomultipla di  $F_R$ , mediante opportune operazioni di moltiplicazione o divisione realizzate anche con tecniche di modulazione.

Mentre è relativamente semplice eseguire una divisione di frequenza, utilizzando circuiti divisori il cui principio di funzionamento è simile a quello del blocco di conteggio illustrato più avanti, la moltiplicazione di frequenza risulta più gravosa. Di solito viene realizzata inviando il segnale di cui si desidera moltiplicare la frequenza ad un circuito distorcente, che fornisce in uscita un segnale ricco di armoniche della frequenza del segnale di ingresso; l'armonica di interesse viene poi isolata mediante un adeguato filtro selettivo. Tale procedimento può teoricamente essere iterato; purtroppo, procedendo con le moltiplicazioni, aumentano notevolmente le incertezze introdotte, per cui questa operazione viene generalmente eseguita solamente una o due volte.

La durata degli intervalli di tempo può normalmente essere variata mediante fattori di 10, assumendo valori da 1 ns fino a 100 o a 1000 s. Chiaramente, più elevata è la massima frequenza disponibile, minore è il minimo intervallo di tempo misurabile.

La scelta del valore fornito dalla base dei tempi può essere eseguita mediante un commutatore; nei più moderni contatori tale frequenza viene selezionata automaticamente in modo da minimizzare l'incertezza introdotta dallo strumento.

## 2.4 Il riferimento di frequenza

L'accuratezza di un contatore è fortemente dipendente dalla stabilità nel tempo dell'oscillatore interno; viene pertanto dedicata una cura particolare alla realizzazione di questa parte dello strumento. A tale scopo vengono utilizzati oscillatori al quarzo con frequenza di oscillazione compresa tra 1 e 10 MHz, ossia nel campo di frequenza che assicura le migliori prestazioni dei quarzi; per ottenere frequenze maggiori si preferisce poi ricorrere a circuiti moltiplicatori, nonostante le già accennate complicazioni circuitali.

Vengono inoltre scelti angoli di taglio, rispetto agli assi cristallografici del quarzo, che consentono di minimizzare l'effetto della temperatura sulla frequenza di oscillazione.

Per strumenti di prestazioni particolarmente elevate, inoltre, l'oscillatore può essere mantenuto in ambiente a temperatura controllata. Normalmente si ricorre a circuiti compensatori che attenuano gli effetti sia della temperatura, sia di altre grandezze di influenza.

## 2.5 Il blocco di conteggio

Questo blocco esegue il conteggio degli impulsi, in genere di tensione, compresi tra il segnale di start e quello di stop. Esso è formato da più contatori elementari modulo M, collegati fra loro in cascata e il cui numero dipende dalle prestazioni dello strumento in esame.

Generalmente M è pari a 10; in questo caso ogni contatore elementare è formato da 4 FF; esso presenta quindi 4 uscite parallele, le quali forniscono in forma codificata, spesso BCD, una cifra decimale del risultato; il peso di ogni cifra dipende poi dalla posizione del contatore elementare nella catena. È inoltre disponibile un segnale digitale di riporto che consente di realizzare il collegamento tra i diversi blocchi elementari. Lo schema di principio di un blocco di conteggio realizzato in questo modo è riportato in fig. 4, dove sono rappresentati i 4 FF di ogni contatore elementare.

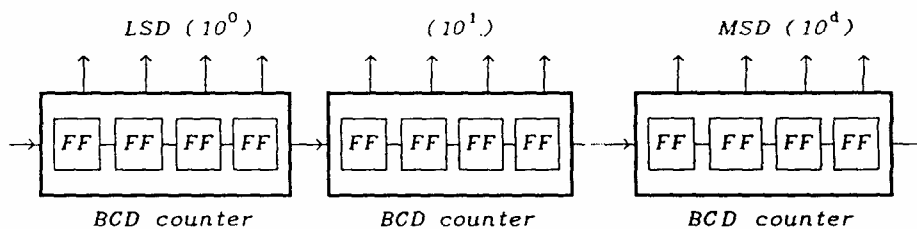


Fig. 4. Struttura generale del blocco di conteggio.

Si noti che lo schema di fig. 4 può essere considerato anche come un divisore per potenze di 10 del numero di impulsi presenti all'ingresso; ogni uscita di riporto presenta, infatti, un impulso ogni  $10^r$  impulsi di ingresso, dove  $r$  rappresenta la posizione occupata dal generico blocco elementare nella catena.

Nello schema di fig. 4 non sono riportati i collegamenti fra i vari FF all'interno di ogni contatore elementare; essi dipendono sia dal tipo di FF utilizzato, sia dal tipo di contatore elementare. Non è inoltre riportato il comando di inizializzazione; una soluzione molto spesso utilizzata a questo scopo consiste nel collegare l'ingresso asincrono di reset di ogni FF a un'unica linea di comando, agendo sulla quale è possibile azzerare l'intero blocco di conteggio.

Si noti infine che la frequenza degli impulsi inviati all'ingresso del blocco di conteggio non può superare un valore massimo, dipendente dal tipo di FF e dallo schema adottato per il contatore elementare. Spesso è inoltre disponibile un segnale digitale (strobe) che indica quando i dati in uscita dai contatori elementari hanno assunto una configurazione valida e stabile.

## 2.6 Il blocco di visualizzazione

Il blocco di visualizzazione è composto non solo dai dispositivi per la presentazione visiva del risultato, normalmente a LED o a cristalli liquidi, ma anche dai circuiti di decodifica che elaborano opportunamente i dati forniti dal blocco di conteggio.

La conversione da cifre codificate BCD fornite dal blocco di conteggio in segnali idonei a pilotare il dispositivo di visualizzazione avviene mediante adatti circuiti integrati, spesso facenti parte degli elementi di presentazione; in molti casi si ha cioè un unico blocco, che visualizza un certo numero di cifre inviate al suo ingresso in forma codificata BCD, e dotato di pochi altri segnali di comando.

Sono spesso utilizzati display a 7 o più segmenti, oppure a matrice di punti. A seconda del tipo di display impiegato è possibile rappresentare, oltre alle cifre decimali, anche un certo insieme di caratteri alfabetici, che possono essere usati per fornire utili indicazioni all'operatore; ad esempio, può essere indicata l'unità di misura associata al valore numerico visualizzato, oppure possono essere segnalate eventuali situazioni anomale, quali un sovraccarico o un errato impiego dello strumento stesso.

Un collegamento diretto tra i blocchi di conteggio e di visualizzazione permette di seguire l'intera evoluzione del conteggio. Ciò può essere utile in alcune situazioni, ma in generale interessa solamente il valore finale raggiunto dal conteggio. Inoltre, se il contatore riprende il conteggio per la misurazione del periodo successivo, come in generale avviene, il valore finale rimane disponibile solo per un tempo circa coincidente a quello di tutti gli altri valori intermedi privi di significato. Adottando un collegamento diretto tra i blocchi di conteggio e di visualizzazione, quindi, la lettura del periodo risulterebbe pertanto poco agevole e quindi facilmente soggetta a incertezze di tipo grossolano.

Quando interessa solamente il numero finale di impulsi contati, per facilitare la lettura, tra il blocco di conteggio e quello di visualizzazione viene interposto un circuito di memoria; in fig. 5 è riportato lo schema logico di tale soluzione relativamente a un'unica uscita del blocco di conteggio.

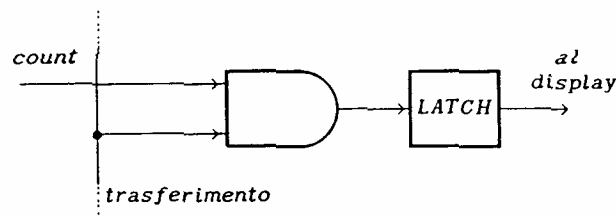


Fig. 5. Impiego di una memoria nel collegamento tra blocco di conteggio e display.

Come si può notare, il segnale in uscita dal contatore viene memorizzato solamente quando il segnale di trasferimento è al livello logico alto. Una volta che il trasferimento è disabilitato, tale informazione rimane quindi disponibile sul latch per la visualizzazione.

La gestione del trasferimento dipende dal tipo di misurazione eseguita. Ad esempio, nel caso della valutazione del periodo, il trasferimento viene abilitato in corrispondenza a ogni

passaggio per lo zero con derivata di segno prefissato del segnale di ingresso; lo stesso comando azzerà inoltre il blocco di conteggio consentendo così l'inizio di un nuovo conteggio per la misurazione del periodo successivo.

Il circuito di fig. 5 deve essere inteso solo come uno schema di principio; devono infatti essere sempre tenute presenti le non idealità dei componenti utilizzati. Ad esempio, per non risentire dei problemi connessi ai ritardi introdotti dai vari componenti, il trasferimento deve essere abilitato solamente quando l'uscita del blocco di conteggio presenta una configurazione valida e stabile.

Generalmente i contatori forniscono in uscita da 3 a 8-10 cifre decimali; il numero di cifre utilizzate dipende infatti dal tipo e dalle prestazioni dello strumento. Ogni cifra richiede un contatore elementare come indicato in fig. 4. Memorizzando in un FF anche il segnale di riporto del contatore elementare corrispondente alla cifra più significativa e con un modesto hardware aggiuntivo è possibile raddoppiare il campo di valori forniti in uscita. In questo modo la cifra più significativa può però assumere solo i valori decimali 0 e 1.

Oltre a utilizzare il segnale di riporto, si possono adottare anche altre soluzioni per aumentare il campo di valori forniti in uscita. Generalmente il valore massimo rappresentabile sul display è però inferiore a quello corrispondente alle cifre a disposizione. In questi casi si parla di strumenti con  $d+1/2$  cifre decimali, intendendo con ciò che è consentita la visualizzazione solo di una parte di tutti i possibili valori rappresentabili con  $d+1$  cifre. Spesso è solo la cifra più significativa che non può assumere tutti i valori che le competono, ma esistono anche altre situazioni. In generale il massimo valore rappresentabile sul display non può però essere dedotto dalla semplice indicazione " $d+1/2$  cifre", ma è determinabile solamente consultando il manuale dello strumento.

Nei contatori è spesso prevista una variazione manuale e/o automatica del fondo scala, ossia del numero massimo di impulsi conteggiabili; ciò è ottenuto eseguendo una predivisione della frequenza di tali impulsi per un opportuno coefficiente. Per semplificare la lettura e la gestione del display è inoltre conveniente che tale coefficiente corrisponda ad una potenza di 10; in tal caso, infatti, una variazione di scala corrisponde solamente a uno spostamento del punto decimale.

Si noti inoltre che la precedente procedura influisce sulla risoluzione della misurazione. Ovviamente, è sempre conveniente scegliere la scala che consente di sfruttare tutte le cifre offerte dallo strumento; in tal modo si ottiene, infatti, una riduzione dell'incertezza relativa dovuta alla risoluzione.

Come è già stato detto, oltre a una gestione di tipo manuale, parecchi contatori prevedono una predisposizione automatica della posizione del punto decimale in base al valore assunto dalla grandezza misurata; ciò permette di ottenere in ogni caso la massima risoluzione consentita. È chiaro che questa caratteristica è molto comoda in quanto evita all'operatore la predisposizione manuale dello strumento. In generale essa comporta però un aumento del tempo necessario per la misurazione in quanto richiede una misurazione ausiliaria.

Quando si devono misurare grandezze il cui valore è prossimo a quello di un fondo scala dello strumento, si possono inoltre manifestare fluttuazioni del valore visualizzato. Questo fenomeno rende difficoltosa la lettura, specialmente se le fluttuazioni sono relativamente veloci; le varie letture eseguite hanno inoltre una risoluzione diversa. Questo inconveniente può essere evitato semplicemente spostando il valore corrispondente al cambiamento di scala dello strumento e introducendo una opportuna isteresi; in tal modo, infatti, piccole variazioni nella grandezza da misurare non provocano lo spostamento del punto decimale.

Se, ad esempio, come mostrato in fig. 6, si sceglie il valore per il cambio di scala in corrispondenza a 180.0 e un'isteresi pari a due unità, si ottiene un'indicazione con risoluzione costante. A causa dell'isteresi, la risoluzione dipende però dai valori precedentemente misurati

dallo strumento; per un dato valore della grandezza misurata, la risoluzione può infatti essere pari a una unità o a un decimo di unità.

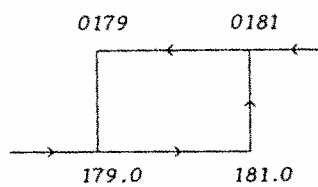


Fig. 6. Visualizzazione con risoluzione costante degli impulsi contati.

### 3. CONTATORE DI EVENTI

Con un'adeguata gestione dei blocchi descritti precedentemente, il contatore permette di eseguire una vasta gamma di misurazioni.

Il modo più semplice di utilizzare un contatore consiste nel conteggio di eventi. La natura di questi eventi può essere molto varia, ma in ogni caso il segnale di ingresso deve essere trasformato in una successione di impulsi di tensione da inviare al blocco di conteggio. I segnali di start e stop possono essere forniti in modo manuale mediante pulsanti posti sul pannello frontale dello strumento, oppure utilizzando generatori di segnale esterni (controllo remoto del conteggio).

Nel conteggio di eventi vengono impiegati solo i circuiti di ingresso, il gate e i blocchi di conteggio e di visualizzazione, come mostrato nello schema di fig. 7.

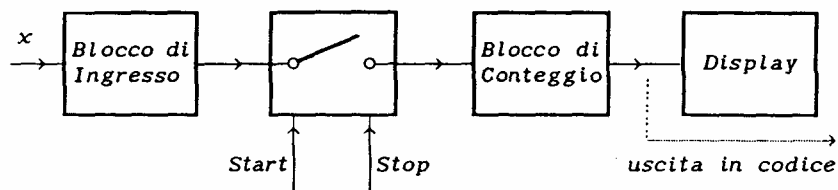


Fig. 7. Contatore di eventi.

In fig. 8 sono mostrati alcuni segnali di interesse nell'ipotesi che gli impulsi da contare siano periodici. Si noti che, a causa della mancanza di sincronizzazione, l'intervallo di tempo durante il quale la porta resta aperta ha una relazione temporale casuale rispetto alla successione di impulsi da contare. Quest'assenza di sincronizzazione introduce un'incertezza nel conteggio pari a  $\pm 1$ . Nel caso di fig. 8, ad esempio, l'intervallo di apertura del gate è pari circa a 4 volte il periodo degli impulsi da contare; il conteggio ottenuto è quindi normalmente 4, ma si possono verificare anche le due situazioni estreme illustrate in figura.

Il comando di start può infatti avvenire immediatamente dopo un impulso da contare, mentre quello di stop può essere fornito immediatamente prima di un impulso successivo; il conteggio ottenuto in questo caso è perciò pari a 3. Se però il comando di start avviene immediatamente prima di un impulso da contare e quello di stop immediatamente dopo un impulso successivo, la durata dell'intervallo di apertura del gate è circa coincidente con quella del caso precedente, ma il conteggio ottenuto è pari a 5. Si conclude pertanto che, in tutte le situazioni in cui la sincronizzazione non è realizzabile, il conteggio può essere affetto da un'incertezza pari a  $\pm 1$ .

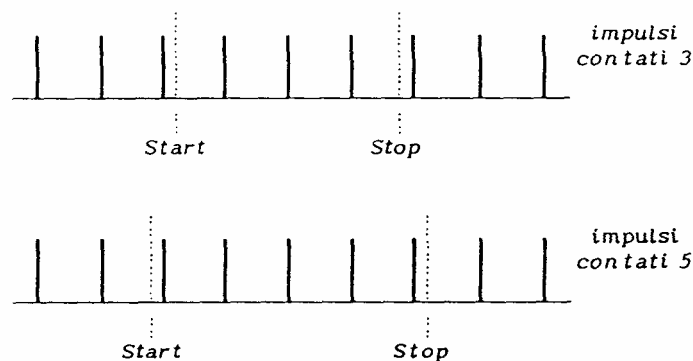


Fig. 8. Introduzione di un'incertezza pari a  $\pm 1$  in un conteggio non sincronizzato.



#### 4. MISURAZIONI DI FREQUENZA

La frequenza di un segnale periodico è data dal rapporto tra il numero di periodi che si verificano in un dato intervallo di tempo e la durata di tale intervallo. Se la durata dell'intervallo temporale è pari a 1 s, il numero di periodi contato fornisce direttamente la frequenza espressa in Hz; se invece è di 1 ms, la frequenza è espressa in kHz, ecc..

È allora immediato comprendere come deve essere predisposto un contatore per fornire la frequenza del segnale di ingresso. A ogni periodo di tale segnale si ottiene un impulso da contare mediante il blocco di ingresso; a questo scopo vengono fissati il livello e la pendenza di trigger. La porta deve rimanere aperta per un ben preciso e noto intervallo di tempo, ottenuto mediante la base dei tempi. Se la durata di tale intervallo è pari a 1 s, il conteggio effettuato rappresenta già la frequenza incognita in Hz. Lo schema a blocchi di un contatore funzionante come frequenzimetro è riportato in fig. 9(a); in fig. 9(b) è invece riportato l'andamento di alcuni segnali di interesse.

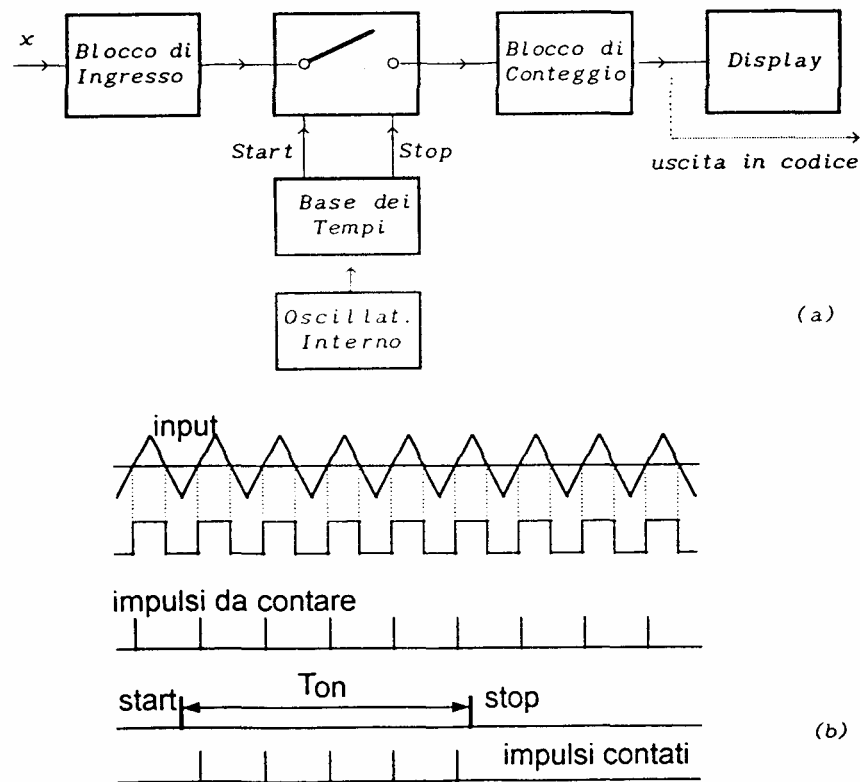


Fig. 9. Schema a blocchi per la misurazione della frequenza (a) e andamento temporale di alcuni segnali di interesse (b).

Detti  $T_{ON}$  la durata dell'intervallo di tempo che intercorre tra il comando di start e quello di stop, e  $T_X$  il periodo del segnale di ingresso, ossia la distanza temporale tra due impulsi, si può scrivere:

$$T_{ON} = N_X T_X$$

dove  $N_X$  è il numero di periodi contati. La simbologia “=” vuole ricordare che la precedente relazione è valida a meno dell'incertezza (“quantizzazione”) introdotta in ogni operazione di conteggio non sincronizzata.

La frequenza  $F_X$  incognita risulta pertanto:

$$F_X = 1/T_x = N_X / T_{ON}$$

ed è perciò ottenuta con una risoluzione pari a:

$$\Delta_F = 1/T_{ON}$$

la quale è inversamente proporzionale alla durata di apertura  $T_{ON}$  del gate. La risoluzione relativa:

$$\Gamma_F = \frac{\Delta_F}{F_X} = \frac{1}{T_{ON} F_X} = \frac{1}{N_X}$$

è invece inversamente proporzionale al numero  $N_X$  di periodi del segnale di ingresso considerati. Tale incertezza diminuisce perciò al crescere del valore di  $N_X$ , ossia del numero di cifre con cui viene espresso il risultato. Per ottenere un numero sufficiente di cifre è quindi necessario adeguare la durata di apertura del gate al valore della frequenza da misurare.

Nella misurazione della frequenza, l'operatore può specificare il tempo di apertura del gate  $T_{ON}$  oppure la risoluzione con cui desidera determinare questa grandezza.

Supponendo di avere fissato il valore di  $T_{ON}$  si può scrivere:

$$N_X = T_{ON} \cdot F_X$$

Poiché  $T_{ON}$  è fissato, il numero impulsi contati è direttamente proporzionale alla frequenza incognita  $F_X$ . Se ad esempio  $T_{ON} = 1$  s ed  $F_X$  è dell'ordine del MHz, si ottiene  $N_X \cong 10^6$ , per cui la risoluzione relativa è dell'ordine di  $10^{-6}$ . Se però  $F_X$  ha un valore di qualche Hz,  $N_X$  è pari solo a qualche unità, e la risoluzione relativa nel conteggio è dell'ordine di  $10^{-1}$ , valore in genere non accettabile.

È però possibile specificare la risoluzione relativa con cui si desidera conoscere il risultato. Dalle relazioni:

$$\Gamma_F = \frac{1}{N_X} \quad \text{e} \quad T_{ON} = \frac{N_X}{F_X}$$

si ricava che, fissato  $\Gamma_F$ , resta fissato anche il numero di conteggi  $N_X$ , mentre il tempo di apertura del gate risulta inversamente proporzionale alla frequenza incognita  $F_X$ .

Se ad esempio si fissa  $\Gamma_F = 0.1\%$  si ricava  $N_X = 1/\Gamma_F = 1000$ . Per valutare una frequenza incognita dell'ordine dei MHz con la risoluzione fissata è sufficiente un tempo dell'ordine del ms, mentre se la frequenza incognita è dell'ordine dell'Hz, per ottenere la risoluzione desiderata è necessario che la durata dei conteggi sia di circa 16÷17 minuti, non accettabile in molte situazioni pratiche.

Le precedenti considerazioni permettono di dedurre che il metodo proposto fornisce buone prestazioni quando la frequenza da misurare è elevata, mentre non è molto adatto per bassi valori di frequenza.

## 5. MISURAZIONI DI PERIODO

Nei casi più semplici, la misurazione di periodo può essere ridotta a quella dell'intervallo di tempo corrispondente al passaggio del segnale di ingresso per lo stesso livello e con la stessa pendenza.

In questo tipo di misurazioni, l'apertura della porta è pertanto ottenuta dal periodo del segnale di ingresso, mentre gli impulsi di conteggio, rigorosamente periodici e di periodo noto, sono forniti dalla base dei tempi. Lo schema che consente questo tipo di misurazione è riportato in fig. 10(a); in fig. 10(b) è invece riportato l'andamento di alcuni segnali di interesse.

Detti  $T_X$  il periodo incognito e  $T_C$  il periodo del segnale fornito dalla base dei tempi, si ha:

$$T_{ON} = T_X = N_C T_C$$

la quale mostra che, noto  $T_C$ , per determinare  $T_X$  è sufficiente contare il numero di impulsi  $N_C$  che transitano attraverso il gate durante l'intervallo di apertura.

Poiché  $T_C$  non può essere ridotto oltre un certo valore minimo dipendente dalla base dei tempi utilizzata, per esprimere il risultato con un adeguato numero di cifre, è necessario che il periodo  $T_X$  incognito sia sufficientemente maggiore del valore minimo di  $T_C$ . Ad esempio, se si desidera esprimere il risultato con 6 cifre, quando  $T_X$  è dell'ordine di 1 s è necessario che la frequenza fornita dalla base dei tempi sia pari a 1 MHz.

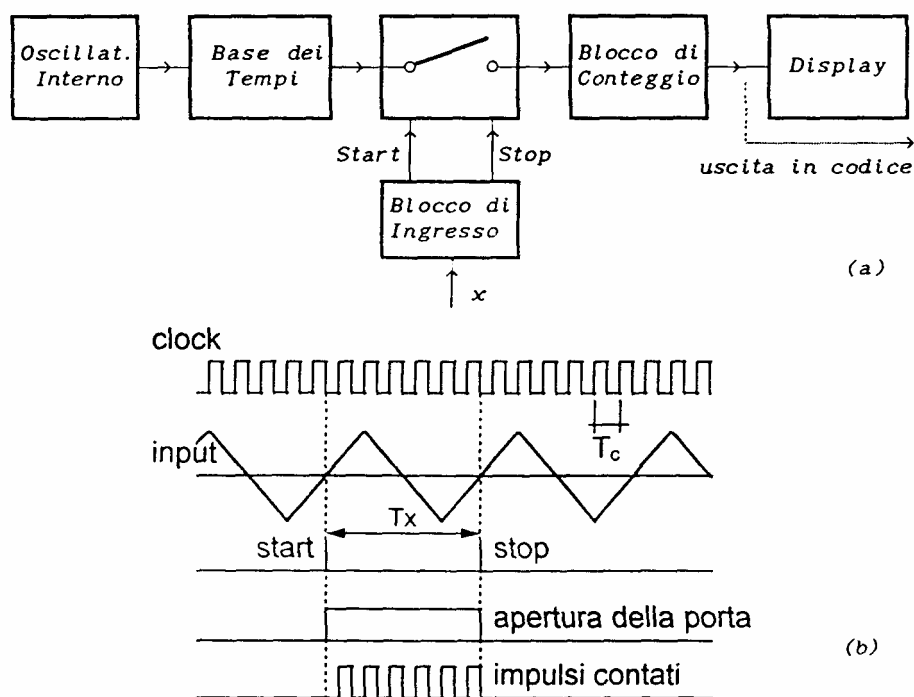


Fig. 10. Schema a blocchi per la misurazione del periodo (a) e andamento temporale di alcuni segnali di interesse (b).

Dalla relazione  $T_{ON} = T_X = N_C T_C$  si ricava immediatamente sia la risoluzione assoluta  $\Delta_T$ , sia quella relativa  $\Gamma_T$ :

$$\Delta_T = T_C$$

$$\Gamma_T = \frac{\Delta_T}{T_X} = \frac{T_C}{T_C N_C} = \frac{1}{N_C}$$

Si deduce quindi che la risoluzione relativa è inversamente proporzionale al numero di impulsi contati  $N_C$ .

Come si può notare, si ha un comportamento duale rispetto a quanto visto per la misurazione della frequenza. Nel caso di segnali periodici di frequenza elevata (relativamente alle prestazioni dello strumento), è pertanto preferibile eseguire una misurazione di frequenza, è invece conveniente misurare il periodo quando si hanno segnali a bassa frequenza.

Da una delle due informazioni è poi possibile ricavare l'altra semplicemente calcolando il reciproco.

Nella valutazione del periodo è possibile ottenere un aumento della risoluzione contando il numero di impulsi generati dalla base dei tempi durante  $N_X$  periodi del segnale di ingresso. Tale approccio è illustrato nello schema di fig. 11, nella quale il divisore in cascata al blocco di ingresso consente di fornire il comando di stop dopo  $N_X$  impulsi. Si noti che, come avviene per la misurazione della frequenza, il risultato fornito rappresenta il periodo medio del segnale durante l'intervallo di apertura del gate.

Il periodo incognito è quindi dato dalla relazione:

$$T_X = \frac{T_{ON}}{N_X} = \frac{N_C T_C}{N_X}$$

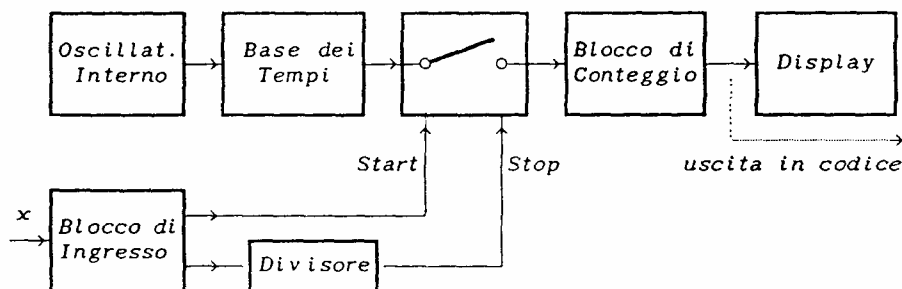


Fig. 11. Schema a blocchi per la misurazione dei periodo medio.

Le risoluzioni assoluta e relativa valgono pertanto:

$$\Delta_T = \frac{T_C}{N_X}$$

$$\Gamma_T = \frac{\Delta_T}{T_X} = \frac{T_C}{N_C T_C} = \frac{1}{N_C}$$

e sono inversamente proporzionali rispettivamente al numero di periodi  $N_X$  e al numero di impulsi contati  $N_C$ .

Si noti però che nella misurazione dei periodo medio il numero di conteggi  $N_C$  è maggiore di quello che si sarebbe ottenuto se il conteggio fosse stato effettuato su un solo periodo, riducendo di conseguenza la risoluzione relativa.

## 6. MISURAZIONE DEL RAPPORTO DI DUE FREQUENZE

Utilizzando lo schema di principio riportato in fig. 12(a) è possibile ottenere il valore del rapporto tra due frequenze incognite. In questo caso l'oscillatore interno non viene utilizzato; sono invece richiesti due canali di ingresso: da un canale si ricava il comando di apertura e chiusura della gate, mentre dall'altro si ottengono gli impulsi da contare. L'andamento temporale di alcuni segnali di interesse è riportato in fig. 12(b).

Si supponga che la durata  $T_{ON}$  di apertura della gate corrisponda a  $N_2$  periodi di durata  $T_2$  del segnale  $x_2$ ; se in tale intervallo vengono contati  $N_1$  impulsi ottenuti dal segnale  $x_1$  di periodo  $T_1$ , si ha:

$$T_{ON} = N_2 T_2 = N_1 T_1$$

dalla quale si ricava:

$$T_2 / T_1 = F_1 / F_2 = N_1 / N_2$$

La possibilità di variare il numero di periodi del segnale  $x_2$ , ossia l'intervallo di apertura della gate, consente di scegliere il numero di cifre del risultato. In particolare, scegliendo  $N_2$  sufficientemente elevato è possibile ottenere un confronto accurato anche di frequenze relativamente prossime tra loro.

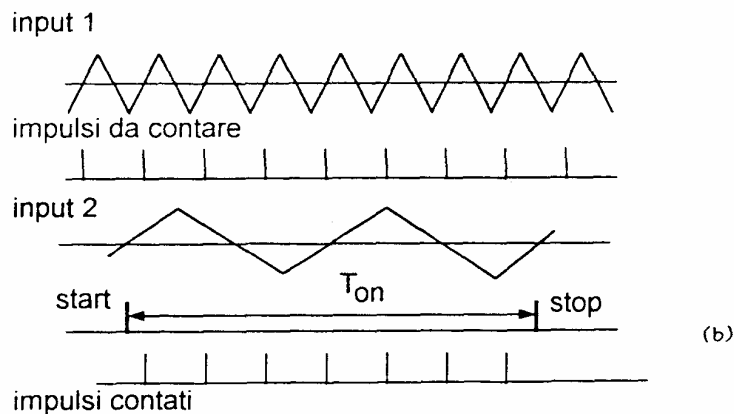
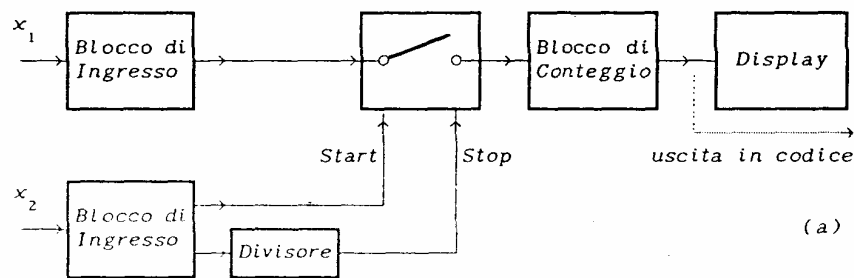


Fig. 12 Schema a blocchi per la misurazione del rapporto di due frequenze (a) e andamento di alcuni segnali di interesse (b).

Ad esempio, se  $F_1 = 100$  kHz e  $F_2 = 22$  kHz, con  $N_2 = 1$  si ha  $N_1 = 4$  o  $5$ ; a causa della risoluzione finita, si ottiene pertanto il rapporto  $F_1/F_2$  con una incertezza relativa pari al 20%. Se però si pone  $N_2 = 100$ ,  $N_1$  risulta pari a 455, per cui il rapporto  $F_1/F_2$  è noto con una incertezza relativa pari allo 0.2%.

Ovviamente, se i segnali non sono rigorosamente periodici, il risultato ottenuto deve essere interpretato come rapporto di valori medi.

## 7. IL CONTATORE RECIPROCO

Come è già stato detto, per ridurre la risoluzione relativa può essere conveniente eseguire una misurazione di periodo anziché una di frequenza. La presenza di un microprocessore nei contatori di recente realizzazione, oltre a consentire una gestione flessibile dell'intero strumento, permette anche la scelta automatica del tipo di misurazione più conveniente. Sul display viene inoltre fornita sempre la grandezza richiesta dall'operatore, eventualmente dopo che lo strumento ha calcolato il reciproco della grandezza misurata. Per questo motivo tali strumenti vengono denominati contatori reciproci.

Si supponga, per semplicità, che la scelta del tipo di misurazione da eseguire sia basata solamente sulla minimizzazione della risoluzione relativa e che la durata  $T_{ON}$  della misurazione sia fissata.

Se viene misurata la frequenza si ha:

$$\Gamma_F = \frac{\Delta_F}{F_X} = \frac{1}{T_{ON} F_X}$$

mentre nella misurazione del periodo si ottiene:

$$\Gamma_t = \frac{\Delta_T}{T_X} = \frac{T_C}{T_{ON}} = \frac{1}{T_{ON} F_C}$$

dove  $T_C$  rappresenta al solito il periodo degli impulsi forniti dalla base dei tempi.

È allora possibile eseguire un confronto delle precedenti relazioni al variare della frequenza del segnale di ingresso, come illustrato in fig. 13. Come si può notare, l'incertezza presente nella misurazione del periodo non dipende da  $F_X$ , mentre nella misurazione della frequenza l'incertezza diminuisce all'aumentare di tale parametro; le incertezze introdotte coincidono solo per  $F_X = F_C$ , ossia quando la frequenza incognita è uguale a quella degli impulsi forniti dalla base dei tempi.

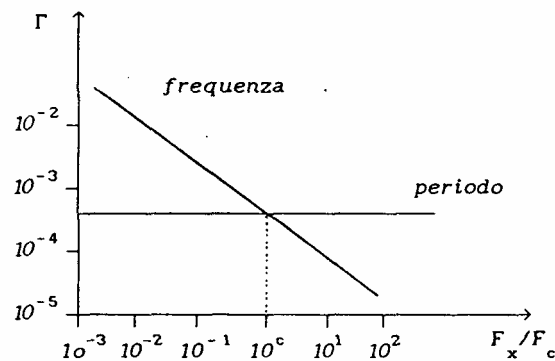


Fig. 13. Andamento della risoluzione relativa in funzione della frequenza del segnale di ingresso, per una data durata  $T_{ON}$  dell'intervallo di apertura del gate.

Si noti anche che una variazione della durata  $T_{ON}$  dell'intervallo di apertura dei gate, produce solamente una uguale traslazione di entrambe caratteristiche di fig. 13.

Si conclude pertanto che se, come spesso accade, si ha  $F_X < F_C$ , è preferibile eseguire una misurazione di periodo; se interessa il valore della frequenza incognita, lo strumento eseguirà poi l'elaborazione necessaria per fornire il risultato richiesto.

L'organizzazione logica di un contatore reciproco è simile a quella vista nel caso della misurazione del periodo medio. In questo strumento, però, l'operatore deve impostare solamente il tempo di misurazione  $T_{ON}$ : il tipo di misurazione più adeguato viene infatti scelto dallo strumento stesso in base alle caratteristiche dei segnale di ingresso.

La fig. 14 mostra lo schema a blocchi semplificato di un contatore reciproco.

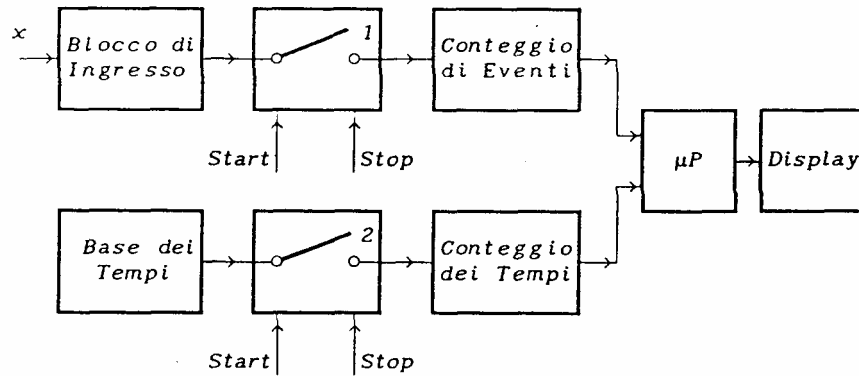


Fig. 14. Schema a blocchi semplificato di un contatore reciproco.

Vi sono due contatori, uno per il conteggio degli impulsi provenienti dalla base dei tempi (conteggio del tempo), e uno per il conteggio degli impulsi ottenuti dal segnale di ingresso (conteggio di eventi o, in questo caso, di periodi) in base al livello e alla pendenza di trigger fissati dall'operatore.

Indicando con  $N_X$  ed  $N_C$  rispettivamente il numero di periodi e il numero di impulsi della base dei tempi contati, i tempi di apertura dei due gate soddisfano le seguenti relazioni:

$$T_{ON} = N_X T_X \qquad T_{ON} = N_C T_C$$

nelle quali  $T_C$  è noto, mentre  $N_C$  ed  $N_X$  vengono misurati. Il microprocessore può quindi valutare il periodo  $T_X$ , o la frequenza  $F_X$ , mediante le relazioni:

$$T_X \cong \frac{N_C T_C}{N_X} \qquad F_X \cong \frac{N_X}{N_C T_C}$$

La scelta della relazione utilizzata viene eseguita dallo strumento stesso in base ai valori di  $N_C$  e di  $N_X$ ; il risultato viene però sempre presentato nell'unità di misura richiesta dall'operatore.

La risoluzione nelle due misure è pari a:

$$\Delta_T = \frac{(N_C + 1)T_C}{N_X} - \frac{N_C T_C}{N_X} = \frac{T_C}{N_X} \qquad \Gamma_T = \frac{\Delta_T}{T_X} = \frac{1}{N_C}$$

$$\Delta_F = \frac{N_X}{N_C T_C} - \frac{N_X}{(N_C + 1)T_C} = \frac{N_X}{T_C N_C (N_C + 1)} = \frac{F_X}{N_C + 1} \qquad \Gamma_F = \frac{\Delta_F}{F_X} = \frac{1}{N_C + 1}$$