

Appunti di “Misure Elettriche”

Capitolo 9 - Misure e strumenti digitali

Richiami sui circuiti integrati digitali.....	2
Introduzione	2
Famiglie logiche digitali.....	2
Proprietà generali delle famiglie logiche.....	2
Concetti generali sulle misure digitali	3
Premessa sugli strumenti digitali	3
Misure analogiche e misure digitali	5
Tipi di strumenti digitali.....	6
Principali strumenti digitali.....	7
Voltmetri digitali.....	7
<i>Voltmetri digitali con microprocessore interno.....</i>	<i>8</i>
Multimetri digitali	9
<i>Visualizzatori a N_p ½ digit.....</i>	<i>9</i>
<i>Errore percentuale nei DVM.....</i>	<i>9</i>
Esempio numerico.....	11
Influenza della temperatura	12
Analizzatori digitali di spettro	13
Strumenti per segnali digitali	15
Contatore universale.....	16
<i>Sezione di ingresso</i>	<i>16</i>
<i>Finestra di scatto.....</i>	<i>17</i>
<i>Microprocessore e porta principale</i>	<i>19</i>
<i>Unità di conteggio decimale (DCU).....</i>	<i>20</i>
<i>Orologio principale</i>	<i>21</i>
<i>Conteggio di impulsi.....</i>	<i>21</i>
<i>Misura di frequenza</i>	<i>22</i>
<i>Misura di periodo</i>	<i>23</i>
<i>Misure di tempo generiche.....</i>	<i>23</i>
<i>Accuratezza e risoluzione.....</i>	<i>24</i>
Analizzatori di stati logici	26
<i>Analisi temporale.....</i>	<i>28</i>
<i>Analisi dei dati.....</i>	<i>29</i>
Qualificatori	29
<i>Ulteriori funzioni</i>	<i>29</i>
Analizzatori di firma	29

Richiami sui circuiti integrati digitali

INTRODUZIONE

I **circuiti digitali** sono costruiti mediante circuiti integrati. Un **circuito integrato** (brevemente **IC**) è un piccolo cristallo di semiconduttore, detto **chip**, contenente i componenti elettronici che funzionano come **porte logiche**. Le varie porte sono interconnesse internamente al chip stesso, al fine di realizzare il circuito richiesto.

Il chip è montato su un **contenitore** di ceramica o di plastica e le connessioni sono saldate ai **pin esterni** per formare il circuito integrato. Il numero di pin può variare da 14, in un contenitore per piccoli circuiti integrati, a 64 e oltre per contenitori più grandi.

Le dimensioni di un circuito integrato sono molto piccole: ad esempio 4 porte AND sono incluse in un contenitore da 14 pin con dimensioni di 20*8*3 millimetri. Un intero microprocessore è incluso invece in un contenitore da 64 pin con dimensioni di 50*15*4 millimetri.

Ogni circuito integrato, per essere identificato, ha una sigla stampata sulla facciata superiore del contenitore. I costruttori pubblicano manuali (**data book**) che contengono le descrizioni e tutte le informazioni necessarie per i circuiti integrati che costruiscono.

FAMIGLIE LOGICHE DIGITALI

I circuiti digitali integrati sono classificati non solo per la loro complessità o per le operazioni logiche svolte, ma anche per la specifica tecnologia circuitale cui appartengono. La tecnologia circuitale individua la **famiglia logica digitale** cui il circuito appartiene.

Ogni famiglia logica ha il proprio **circuito elementare di base**, sulla base del quale gli altri circuiti e componenti digitali più complessi sono realizzati. Il circuito base in ogni tecnologia è la porta NAND o la porta NOR o la porta NOT. I componenti elettronici usati per la costruzione di queste porte di base sono generalmente usati per dare il nome alla tecnologia e quindi alla famiglia logica.

Sono molte le famiglie logiche di circuiti integrati digitali introdotte in commercio. Le più popolari sono le seguenti:

TTL: transistor-transistor logic

ECL: emitter-coupled logic

MOS: metal-oxide semiconductor

CMOS: complementary metal-oxide semiconductor

PROPRIETÀ GENERALI DELLE FAMIGLIE LOGICHE

La famiglia TTL è stata introdotta non da molto tempo ed è adesso considerata come uno standard. Essa è l'evoluzione di una precedente famiglia che usava diodi e transistor per realizzare la porte elementare NAND. Questa tecnologia era chiamata **DTL**, che sta per *Diode-Transistor Logic*.

Più tardi, i diodi furono sostituiti dai transistor per migliorarne le prestazioni e si passò quindi alla TTL.

I circuiti della famiglia ECL forniscono la maggiore velocità possibile tra le varie famiglie logiche. Essi sono usati in sistemi come i supercomputer o gli elaboratori digitali di segnali (DSP), dove l'alta velocità di elaborazione è essenziale.

La famiglia MOS è utile per circuiti che richiedono una alta densità di integrazione. Si tratta di tecnologia di tipo unipolare (basata cioè su un solo tipo di portatori, al contrario della TTL o della ECL, che sono bipolari) : se i portatori sono elettroni, si parla di N-MOS, se invece i portatori sono le lacune allora si parla di P-MOS. Gli N-MOS sono i circuiti più comunemente utilizzati.

La famiglia CMOS è preferibile in quei sistemi che richiedono essenzialmente un basso consumo di potenza. E' una tecnologia che usa sia transistor P-MOS sia transistor N-MOS.

I principali vantaggi delle famiglie MOS e CMOS, rispetto ai transistori bipolari, sono la maggiore densità di integrazione raggiungibile, un processo di fabbricazione più semplice e un minore consumo (che rende quindi più economico il funzionamento).

Le caratteristiche delle famiglie logiche sono generalmente confrontate analizzando i circuiti delle rispettive porte logiche di base. Come vedremo meglio in seguito, i principali parametri messi a confronto sono i seguenti:

- **fan-out:** esso specifica il numero di carichi standard (*standard loads*) che l'uscita della porta di base può pilotare senza pregiudicare il corretto funzionamento del sistema;
- **dissipazione di potenza:** esso specifica la potenza consumata da una porta, cioè la potenza che dobbiamo fornire alla porta mediante una alimentazione apposita;
- **ritardo di propagazione:** è il tempo necessario affinché il segnale si propaghi dall'ingresso all'uscita e determina evidentemente in modo rilevante la velocità di elaborazione (la quale è infatti inversamente proporzionale al ritardo);
- **marginale di rumore:** è la minima tensione esterna di rumore che causa un indesiderata variazione dell'uscita del circuito; serve a caratterizzare l'immunità dei circuiti al rumore elettronico ed elettromagnetico.

Concetti generali sulle misure digitali

PREMESSA SUGLI STRUMENTI DIGITALI

Uno **strumento digitale** può essere visto semplicemente come una combinazione di porte logiche che cambiano stato a velocità molto elevata. Gli strumenti digitali si stanno diffondendo in modo sempre più massiccio, tale da soppiantare molto velocemente, nella maggior parte delle applicazioni, quelli analogici. Rispetto a questi ultimi presentano, infatti, diversi vantaggi, tra cui il principale è probabilmente il costo minore: possiamo infatti affermare che, *a parità di costo, l'accuratezza e la risoluzione di uno strumento digitale risultano di un ordine di grandezza superiori a quelle di uno strumento analogico che svolga le stesse funzioni.*

I pregi fondamentali della strumentazione elettronica sono i seguenti:

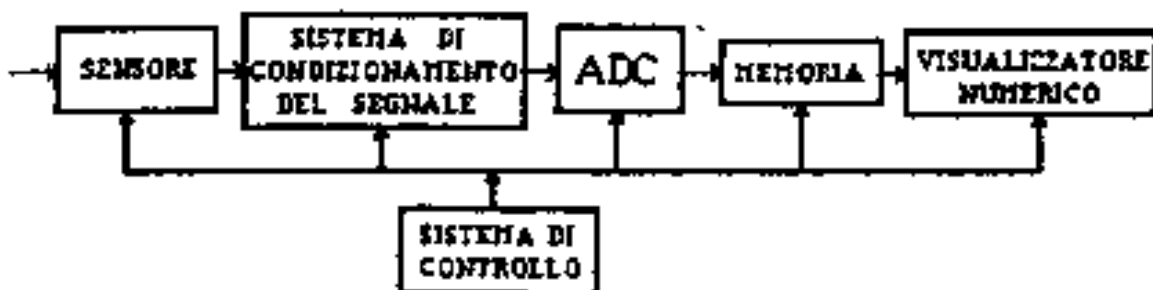
- la facilità di lettura: essendo i dati presentati su un **visualizzatore numerico**, le letture fatte dall'operatore sono senz'altro più attendibili (ad esempio, è nullo l'*errore di parallasse*, che invece affligge gli strumenti ad indicazione analogica);
- gli alti livelli di accuratezza e risoluzione, dovuti essenzialmente alla disponibilità di componenti veloci e ad elevato numero di bit;
- gli alti valori di velocità sia di campionamento sia di conversione, il che consente processi **in tempo reale**;
- l'elevata immunità al rumore ed ai processi di deriva, tipici dei componenti elettronici e quindi degli strumenti analogici su essi basati;
- la possibilità di ulteriori elaborazione dei dati acquisiti;
- la sempre maggiore intelligenza interna degli strumenti cosiddetti **esperti**;
- l'indicazione automatica della polarità delle grandezze misurate (tipicamente tensione o corrente);
- la selezione automatica della portata;
- la possibilità di utilizzare i cosiddetti **auto test**, che permettono l'**autotaratura** e/o l'**autoconfigurazione** degli strumenti in presenza di indicazioni di situazioni anomale;
- la possibilità di programmare gli strumenti in ambito **CAT** (*Computer Aided Testing*).

A fronte di questi pregi, possiamo citare però anche dei limiti fondamentali:

- la dipendenza delle prestazioni dalla temperatura;
- la sensibilità ai campi elettromagnetici;
- la presenza degli errori tipici del processo di conversione A→D, ossia errori di aliasing, di troncamento e di quantizzazione;
- la necessità di utilizzare algoritmi di interpolazione laddove si vogliano calcolare valori del segnale in istanti intermedi tra quelli di campionamento.

In generale, gli strumenti digitali sono molto flessibili e, tra l'altro, grazie all'avvento di nuovi **sensori intelligenti**, il loro campo di applicazione si è ulteriormente e notevolmente espanso.

Volendo ideare uno schema a blocchi per un generico strumento digitale, possiamo considerare il seguente:



Si individua immediatamente un **sistema di controllo** che sovrintende al funzionamento dell'intero strumento ed è accessibile all'operatore tramite appositi **comandi** posti generalmente sul **pannello frontale** dello strumento stesso.

Tramite un **sensore** (o **trasduttore**), la grandezza sotto misura, che potrebbe anche non essere di natura elettrica, viene trasformata in una tensione elettrica (continua) ad essa proporzionale e tale segnale rappresenta l'ingresso (analogico) dello strumento.

Dopo un iniziale **fase di condizionamento** (tipicamente avremo una amplificazione/attenuazione ed un filtraggio passa-basso per minimizzare o eliminare problemi di aliasing), il segnale viene sottoposto alla conversione A→D, svolto da un dispositivo **ADC** del tipo descritto in precedenza. *Proprio l'ADC costituisce il cuore del sistema, nel senso che ne determina le prestazioni in termini sia di velocità sia di accuratezza.*

L'uscita dell'ADC è dunque un insieme di campioni (ovviamente in numero finito) che vengono conservati in una apposita **memoria** e da essa estratti per successive elaborazioni (compiute da un eventuale **microprocessore** interno al sistema) o semplicemente per la visualizzazione su un **visualizzatore numerico**.

Sono molto importanti i **circuiti di post-elaborazione digitale** (filtri numerici, algoritmi e così via); spesso, gli strumenti digitali sono classificati proprio in base al tipo di circuiti che svolgono questa elaborazione.

MISURE ANALOGICHE E MISURE DIGITALI

Prima di analizzare le caratteristiche degli strumenti digitali, concentriamoci su alcuni concetti generali legati alle misure effettuate tramite questo tipo di strumenti.

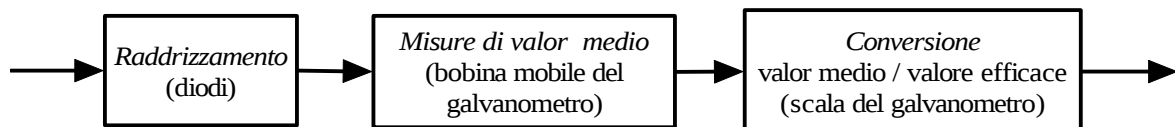
Per prima cosa, sottolineiamo la differenza tra misure analogiche e misure digitali:

- una misura si dice **digitale** quando è il risultato di una elaborazione numerica eseguita su una versione digitalizzata del segnale di ingresso;
- una misura si dice invece **analogica** quando è il risultato di una elaborazione analogica eseguita direttamente sul segnale di ingresso.

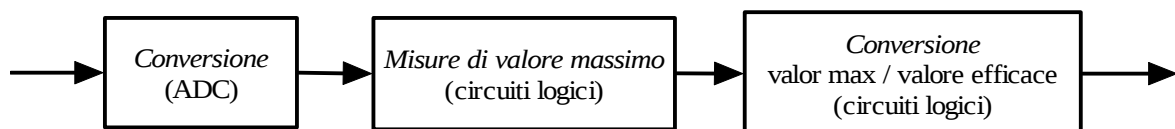
Per comprendere bene questa distinzione, riferiamoci ad un caso pratico, quale ad esempio la misura di valore efficace di un segnale sinusoidale.

Nella figura seguente sono riportati i diagrammi a blocchi che descrivono il procedimento di misura, sia nel caso analogico sia in quello digitale:

Misura analogica



Misura digitale



Della misura analogica del valore efficace ci siamo già occupati in precedenza: abbiamo infatti visto che è necessario prima raddrizzare il segnale, in modo che il valore medio del segnale raddrizzato coincida con il valore efficace del segnale originale; tale valore medio viene quindi

misurato, ad esempio tramite il classico galvanometro PMMC, e poi è la scala stessa dello strumento a provvedere alla conversione da valore medio in valore efficace.

Nel caso di misura digitale, invece, la prima fase è necessariamente quella di conversione A→D del segnale sotto misura; sulla versione digitalizzata del segnale viene condotta, tramite appositi circuiti logici, una misura di valore massimo, che viene successivamente convertita, tramite altri circuiti logici, nella desiderata misura di valore efficace.

Quelli appena descritti sono metodi di misura dell' R.M.S. che valgono solo per una prefissata forma d'onda, in questo caso di natura sinusoidale. D'altra parte, noi sappiamo che il valore efficace è definibile per una qualsiasi grandezza alternata, tramite la formula

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Di conseguenza, possiamo pensare di realizzare **strumenti a vero valore efficace**. Qui subentra una ulteriore importante differenza tra la misura analogica e quella digitale:

- nel caso della misura analogica, dobbiamo cambiare completamente lo strumento di misura ed abbiamo visto in precedenza quali sono le possibili soluzioni (ad esempio un elettrodinamometro oppure un circuito con termocoppie);
- nel caso della misura digitale, invece, nel caso peggiore dobbiamo semplicemente cambiare i circuiti logici. Parliamo di caso peggiore perché c'è anche un'altra possibilità: infatti, dato che uno strumento digitale dispone dei campioni del segnale in ingresso, possiamo pensare di trasferire tali campioni ad un calcolatore, nel quale caso dovremo semplicemente cambiare il software con cui eseguiamo la misura sulla base dei campioni disponibili. E' evidente che, con un procedimento di questo tipo, siamo in grado di effettuare misure anche notevolmente complesse, talvolta impensabili per una strumentazione analogica.

Queste considerazioni mostrano dunque quanto maggiori siano la versatilità e la potenza della strumentazione digitale rispetto a quella analogica.

TIPI DI STRUMENTI DIGITALI

Si è detto in precedenza che i *circuiti logici di post-elaborazione digitale* determinano la classificazione degli strumenti digitali. Possiamo allora individuare 3 fondamentali categorie di strumenti digitali:

- negli **strumenti a logica cablata**, i circuiti logici non sono programmabili dall'utente; casi tipici sono il multimetro digitale e l'oscilloscopio digitale di tipo tradizionale;
- negli **strumenti a logica programmata**, l'elaborazione dei dati acquisiti avviene tramite appositi software; casi tipici sono quello dell'oscilloscopio digitale con calcolatore integratore oppure il sistema costituito da una scheda di acquisizione dati installata su PC e da un relativo programma di elaborazione (ad esempio il semplice *Matlab*);
- negli **strumenti virtuali**, è ancora presente una scheda di acquisizione dati, che fornisce i dati ad un programma che emula il pannello reale dello strumento; tipico caso è quello del programma *Labview* (sempre con annessa scheda di acquisizione);

Principali strumenti digitali

VOLTMETRI DIGITALI

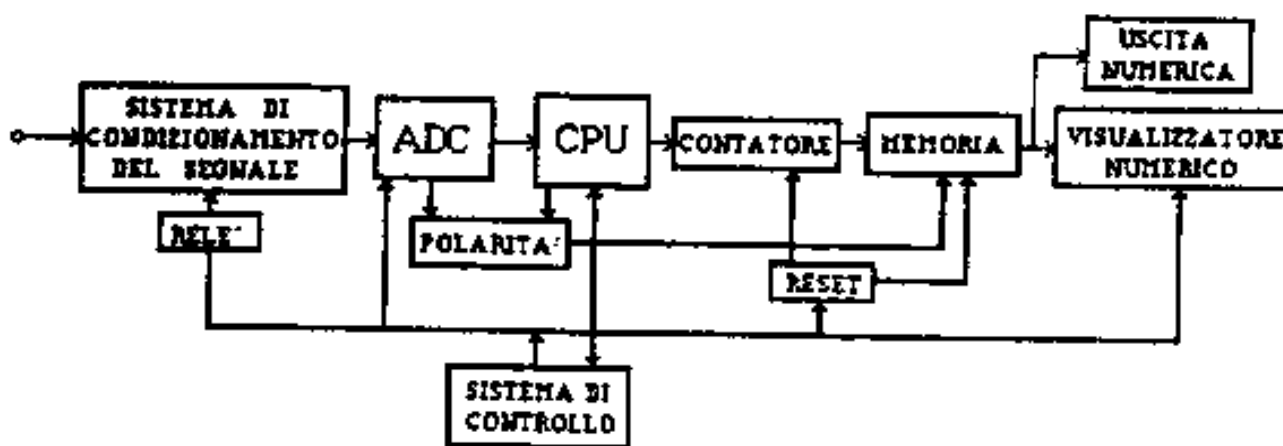
I **voltmetri digitali** sono anche noti con l'acronimo **DVM** (*Digital Volt Meter*). Sono strumenti molto versatili ed accurati. Il cuore di questi strumenti è rappresentato dal convertitore analogico-digitale (ADC), che permette di passare dalla tensione analogica sotto misura alla sua rappresentazione numerica, oggetto della misura vera e propria. La classificazione dei DVM viene fatta proprio in base al tipo di ADC utilizzato.

Il segnale in ingresso all'ADC può provenire da diverse sorgenti: può essere direttamente un ingresso continuo oppure può essere l'uscita di un SHA o di un convertitore c.a./c.c.. In ogni caso, una volta effettuata la conversione in binario, l'ADC invia la parola binaria al visualizzatore numerico oppure ad un opportuno sistema di visualizzazione dati.

Quando si è interessati solo alla misura del valore efficace di una grandezza alternata, è sufficiente porre, a monte dell'ADC, un **convertitore c.a./c.c.**: in questo caso, quasi sempre si usano *convertitori a vero valore efficace*, del tipo esaminato in precedenza, che assicurano elevata accuratezza anche in presenza di forme d'onda distorte (cioè non puramente sinusoidali).

Uno dei principali pregi di un DVM è la facilità di utilizzazione: per esempio, quasi tutti i DVM possiedono l'indicazione automatica della polarità della tensione misurata, la scelta automatica della portata, l'indicazione dell'eventuale sovraccarico. Inoltre, si sta diffondendo l'abitudine di aggiungere, al visualizzatore numerico tipico della strumentazione digitale, anche un più tradizionale **visualizzatore analogico**, costituito generalmente da una catena di segmentini che si accendono o si spengono in successione, scorrendo su una scala graduata. In tal modo, si aggiungono, ai vantaggi di una lettura numerica, quelli della lettura analogica.

Scendendo in maggiori dettagli, osserviamo che i DVM di media accuratezza più diffusi usano un ADC a doppia rampa, del tipo descritto in precedenza, che garantisce un elevato CMRR e buoni valori di velocità e risoluzione. Uno schema di massima è quello riportato nella figura seguente:



Il primo stadio effettua un **condizionamento** del segnale prima della conversione tramite l'ADC. I blocchi successivi consentono di implementare tutte le funzioni di misura e di impostazione dello strumento di cui si diceva prima. E' anche presente una **unità di elaborazione** (CPU) per calcoli di maggiore complessità.

Valori tipici di **risoluzione** di questi voltmetri sono di 1 mV per il funzionamento in corrente alternata e di 100 μ V per funzionamento in continua. E' possibile anche scendere a valori inferiori

tramite un miglioramento del rapporto segnale/rumore ed un preciso controllo delle derivate dei dispositivi elettronici.

Voltmetri digitali con microprocessore interno

I DVM di maggior pregio sono quelli che includono al loro interno un **microprocessore** (brevemente **μP**). In particolare, questo tipo di DVM sono classificati a seconda che il μP esegua l'analisi dei dati campionati nel dominio del tempo oppure in quello della frequenza.

Cominciamo dall'analisi nel dominio del tempo. Ricordiamo intanto che il valore efficace di una grandezza analogica alternata $v(t)$ è definito nel modo seguente:

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Allora, quando il μP esegue una analisi nel dominio del tempo, si occupa semplicemente di calcolare il valore efficace tramite la seguente formula approssimata:

$$V_{\text{eff}} \cong \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V(t_k) V(t_k)}$$

dove ovviamente N è il numero di campioni memorizzati della forma d'onda in ingresso e utilizzati in quella sommatoria.

Se invece il μP esegue l'analisi nel dominio della frequenza, allora i passi seguiti sono i seguenti:

- in primo luogo, viene applicata ai dati campionati la formula della FFT, in modo da avere una stima dello spettro del segnale in ingresso;
- in secondo luogo, l'analisi di tale stima conduce ad individuare le armoniche del segnale in ingresso;
- infine, la stima del valore efficace della forma d'onda in ingresso viene calcolato tramite le ampiezze delle varie armoniche individuate, secondo la formula seguente:

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{V_{\text{dc}}^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots}$$

dove evidentemente V_{DC} è l'ampiezza della componente continua, mentre gli altri termini sono le ampiezze delle componenti a frequenza non nulla.

Una osservazione molto importante è la seguente: in quei DVM a microprocessore in cui viene effettuata l'analisi nel dominio del tempo, è molto importante scegliere il numero N di campioni ed il periodo di campionamento in modo tale che venga processato un numero intero di periodi del segnale in esame; questo perché, in caso contrario, si incorrerebbe in **errori di troncamento**, con conseguente scarsa accuratezza della misure effettuate; al contrario, nei DVM a μP che eseguono l'analisi nel dominio della frequenza, questo aspetto non è importante: infatti, attraverso l'analisi spettrale è possibile valutare l'eventuale errore di troncamento e quindi lo si può correggere mediante opportuni algoritmi. A fronte di questo vantaggio, i DVM che eseguono l'analisi nel dominio della frequenza hanno una architettura complessa, necessaria a poter operare in tempo reale (si tratta di concetti tipici di *Elaborazione numerica dei segnali*).

MULTIMETRI DIGITALI

I **multimetri digitali** (brevemente **DMM**, *Digital Multi Meter*) possono eseguire misure di tensione, corrente, resistenze (e talvolta anche impedenze), sia in corrente continua sia in corrente alternata. Sono un esempio classico di strumenti a logica cablata, in quanto non sono programmabili da parte dell'utente.

Questi strumenti hanno una impedenza di ingresso molto elevata, anche superiori ai 10 MΩ, per cui sono decisamente trascurabili gli effetti di carico e quindi i corrispondenti errori di consumo.

Il cuore di questi strumenti è un **voltmetro digitale** (DVM), del tipo descritto nel precedente paragrafo. Oltre al DVM, altri componenti importanti sono i seguenti:

- un **partitore di tensione** per la variazione automatica della portata (caratteristica, questa, comune a tutti gli strumenti digitali);
- un **amplificatore a guadagno variabile**, seguito da un **limitatore di tensione**;
- un **convertitore corrente-tensione** (realizzato ad esempio tramite la nota configurazione ad op-amp);
- un **convertitore c.a./c.c.** per le misure in corrente alternata (generalmente è del tipo a vero valore efficace);
- un **convertitore resistenza-tensione** per le misure di resistenza;
- un convertitore da alta a bassa frequenza, per quei voltmetri in cui si vuole estendere il campo di misura fino ai MHz;
- un **convertitore capacità-tempo**, laddove si voglia consentire anche la misura di capacità: viene qui sfruttato il principio per cui, caricando un condensatore C tramite un generatore di corrente costante I, in un intervallo di tempo t risulta valida la relazione $C = \frac{I}{E_r} t = k \cdot I$, con k costante.

Visualizzatori a $N_p \frac{1}{2}$ digit

Sia i DMM sia gli stessi DVM sono spesso classificati in base al **numero di cifre piene** N_p disponibili sul visualizzatore. Oltre ad N_p cifre piene, c'è però anche una *mezza cifra* (detta **cifra parziale**), dovuta ai due soli possibili valori (0 ed 1) assumibili da parte della cifra all'estremo sinistra del visualizzatore. Nelle specifiche dello strumento, compare dunque l'indicazione

$N_p \frac{1}{2}$ digit

Tipicamente, gli strumenti digitali hanno visualizzatori con **numero di digit** variabile tra **3 ½** e **8 ½**. Evidentemente, uno strumento da 3 ½ digit ha una risoluzione di 1 parte su 2000, mentre uno da 8 ½ digit ha una risoluzione di una parte su $2 \cdot 10^8$.

Errore percentuale nei DVM

Dato che il cuore di un multimetro digitale è nel suo voltmetro digitale, l'errore commesso dallo strumento dipende da quello commesso dal voltmetro. Questo errore varia con le caratteristiche costruttive, con la tecnologia utilizzata e con il costo. Valori tipici, in termini di **errore**

percentuale, sono compresi tra lo **0.1%** e lo **0.001%**. E' anche possibile scendere a valori ancora inferiori, inferiori a **1 parte per milione (ppm)**, ma in questo caso la stabilità delle prestazioni è garantita solo per un tempo specificato; una volta superato questo tempo, è necessario ritarare lo strumento oppure bisogna rassegnarsi ad errori maggiori.

Un errore tipico degli strumenti digitali è quello cosiddetto **di conteggio**: esso è dovuto alla mancanza di sincronizzazione tra il treno di impulsi che viene contato dall'unità di conteggio e la durata del conteggio stesso. In base a questo, è evidente che l'errore può essere tutt'al più di 1 impulso contato in meno o in più, da cui la simbologia *errore di conteggio* ± 1 .

Nelle specifiche dei DVM e dei DMM, sono sempre forniti due valori di errori percentuali:

- **l'errore percentuale di lettura**, indicato con $e_{L\%}$, è un valore espresso in % della lettura effettuata ed è quindi crescente all'aumentare della lettura stessa;
- **l'errore percentuale di portata** (indicato con $e_{P\%}$), invece, è una quantità costante analoga all'errore di indicazione negli strumenti analogici. Esso viene fornito normalmente in % della portata, ma talvolta è espresso anche in termini di valore assoluto (espresso in digit), come diremo tra poco.

Da questi due errori è possibile risalire all'**errore percentuale complessivo**, indicato con $e_{\%}$: indicando infatti con **P** la portata dello strumento e con **L** la lettura effettuata, si ha che

$$e_{\%} = e_{L\%} + e_{P\%} \frac{P}{L}$$

Come anticipato prima, l'errore di portata viene talvolta fornito in termini di errore assoluto in digit con riferimento all'ultima cifra sulla destra del visualizzatore; ad esempio, viene detto che **l'errore assoluto di portata** è

$$E_P = \pm 2 \text{ digit}$$

In questo caso, per calcolare $e_{P\%}$ basta applicare la seguente formula:

$$e_{P\%} = \frac{E_P}{N_{\max}} \cdot 100$$

dove $N_{\max}$ è la massima indicazione ottenibile dal visualizzatore.

Facciamo un esempio concreto. Consideriamo un DVM a basso costo che abbia le seguenti caratteristiche:

- visualizzatore a 3 ½ digit;
- errore percentuale di lettura $e_{L\%} = \pm 2\%$;
- errore assoluto di portata $E_P = \pm 2 \text{ digit}$.

Per applicare la formula $e_{\%} = e_{L\%} + e_{P\%} \frac{P}{L}$, dobbiamo calcolare $e_{P\%}$: avendo un display a 3 ½ digit, la massima indicazione ottenibile è 1999, per cui

$$e_{P\%} = \frac{E_P}{N_{\max}} \cdot 100 = \frac{\pm 2}{1999} \cdot 100 = 0.10005\% = 0.1\%$$

Abbiamo dunque un errore percentuale di portata dello 0.1%.

L'errore percentuale complessivo dobbiamo chiaramente calcolarlo in riferimento ad una specifica misura L . Supponiamo allora di compiere una misura a fondo scala, per cui $L=P$; da qui deriva che l'errore percentuale complessivo è banalmente la somma dei due errori percentuali:

$$e_{\%} = e_{L\%} + e_{P\%} \frac{P}{L} = e_{L\%} + e_{P\%} = 0.2\% + 0.1\% = 0.3\%$$

Se invece avessimo ottenuto una lettura $L=P/2$, l'errore sarebbe salito a

$$e_{\%} = e_{L\%} + e_{P\%} \frac{P}{L} = e_{L\%} + e_{P\%} \cdot 2 = 0.4\%$$

Questo aumento dell'errore conferma ancora una volta che l'errore complessivo, in qualsiasi misura (con strumentazione digitale oppure anche analogica), è tanto minore quanto più la lettura si avvicina al valore di fondo scala.

Esempio numerico

Sempre a titolo di chiarimento dei concetti appena esposti, supponiamo di dover compiere una misura tramite un multimetro digitale con funzione di voltmetro. In particolare, supponiamo che il display abbia 4 cifre significative (per cui la massima indicazione è 9999).

Supponiamo che, per la misura in questione, la portata dello strumento sia impostata sul valore $P=20V$. Supponiamo inoltre che la targhetta dello strumento fornisca le specifiche sull'errore nel modo seguente:

$$e_{\%} = \pm[0.2\% \text{ rdg} + 3 \text{ digit}]$$

In base a quanto visto prima, siamo perfettamente in grado di interpretare queste specifiche:

- errore relativo percentuale di lettura (espresso direttamente come percentuale della lettura, indipendente dalla lettura e dalla portata):

$$e_{L\%} = 0.2\%$$

- errore percentuale di portata (espresso come errore assoluto in digit, indipendente dalla lettura): avendo un display a 4 digit, la massima indicazione ottenibile è 9999, per cui

$$e_{P\%} = \frac{E_p}{N_{\max}} \cdot 100 = \frac{\pm 3}{9999} \cdot 100 = 0.03\%$$

L'errore relativo percentuale totale ha dunque l'espressione

$$e_{\%} = e_{L\%} + e_{P\%} \frac{P}{L} = 0.2 + 0.03 \cdot \frac{20}{L}$$

Supponendo, ad esempio, che la lettura sia stata $L=18.25V$, abbiamo che

$$e_{\%} = 0.2 + 0.03 \cdot \frac{20}{18.25} = 0.232\%$$

Se adesso moltiplichiamo per il valore misurato L e dividiamo per 100, otteniamo l'errore assoluto:

$$E = e_{\%} \cdot \frac{L}{100} = 0.232 \cdot \frac{18.25}{100} = 0.0425V$$

Ovviamente, questo non è l'errore effettivamente commesso (che non potremo mai conoscere), ma l'incertezza, cioè una maggiorazione di tale errore.

Quella appena descritta è una situazione in cui la targa associata allo strumento fornisce indicazioni specifiche sugli errori percentuali. Potrebbe però anche capitare di non avere a disposizione tali indicazioni. In questi casi, si può procedere in modo abbastanza empirico, osservando quali sono le **cifre stabili** nella lettura fornita dal display dello strumento.

Per comprendere questo concetto, consideriamo un **frequenzimetro digitale** impostato per la misura del periodo di un segnale periodico in ingresso. Supponiamo che la lettura dello strumento sia del tipo seguente:

$$T = 19,99XXX \text{ ms}$$

Con questa simbologia, abbiamo inteso indicare con XXX le cifre che risultano **variabili** (non stabili) sul display, al contrario delle altre che invece appaiono **stabili**.

Sulla base di ciò, è *possibile assegnare empiricamente un errore di ± 1 digit sull'ultima cifra stabile*, che in questo caso cade sui centesimi di millisecondo: questo significa che l'errore assoluto massimo (quindi l'incertezza) attribuibile alla misura è

$$dT = \pm 0.01ms$$

cui ovviamente corrisponde un errore relativo (massimo) pari a

$$\frac{dT}{T} = \pm \frac{0.01}{19.99} = 0.0005$$

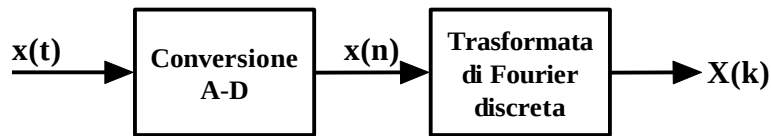
Influenza della temperatura

Come è noto, l'accuratezza di un qualsiasi strumento è legata alle particolari condizioni operative ed alle grandezze di influenza. Di particolare importanza è la **temperatura**, per cui il costruttore fornisce il campo di valori di temperatura che garantiscono il normale funzionamento, nonché l'**errore percentuale di temperatura** per misure al di fuori del suddetto campo.

ANALIZZATORI DIGITALI DI SPETTRO

L'**analizzatore di spettro** è, come noto, uno dei principali strumenti per l'analisi armonica di un segnale, ossia per l'analisi nel dominio della frequenza.

Un analizzatore digitale di spettro si basa sulla nota **trasformata di Fourier discreta** (brevemente **DFT**); in pratica, senza scendere in eccessivi dettagli, possiamo far riferimento al seguente schema a blocchi:



Il segnale di partenza **x(t)** è di tipo analogico e viene perciò per prima cosa convertito in forma digitale; tale conversione dà quindi origine ad un numero finito N di campioni del segnale di partenza, ossia ad un segnale tempo-discreto **x(n)**. Il numero N di campioni dipende dall'operatore e, in particolare, dai requisiti che egli vuole ottenere nella propria analisi.

La sequenza di campioni viene elaborata secondo la formula della DFT:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

Questa formula fornisce una versione campionata dello spettro del segnale in questione, ossia fornisce i valori (in termini di modulo e fase oppure di parte reale e parte immaginaria) che tale spettro assume in corrispondenza di determinate frequenze (dette **frequenze di campionamento**) equispaziate.

La possibilità di calcolare la DFT del segnale **x(n)** deriva dall'esistenza di un particolare algoritmo, noto come **FFT** (*Fast Fourier Transform*), che permette di calcolare la suddetta trasformata in modo estremamente efficiente. In particolare, l'efficienza massima si ottiene quando il numero N di campioni su cui è applicata la FFT è una potenza di 2: ad esempio, molto diffuse sono le FFT a 1024 punti, cioè il calcolo dello spettro di **x(t)** in 1024 frequenze distinte. Ad ogni modo, esistono versioni della FFT applicabili anche a sequenze che non sia lunghe una potenza di due.

La DFT è applicabile sia su segnali deterministici sia su segnali aleatori: nel primo caso, si è generalmente interessati allo spettro di un segnale specifico, mentre invece nel secondo caso si è generalmente interessati a problemi di **stima spettrale**, ossia a stimare le caratteristiche di segnali che possono avere più possibili realizzazioni¹.

Gli analizzatori digitali di spettro consentono l'analisi completa delle forme d'onda, con la possibilità di visualizzarne lo spettro e di misurarne distorsione ed eventualmente modulazione. Per esempio, se si sta usando, come sensore dello strumento, una antenna e si sta analizzando in tempo reale lo spettro del segnale proveniente da una *stazione radiofonica*, ci sono alcuni modelli che consentono di demodulare il segnale, tanto che, collegando un altoparlante al dispositivo, è possibile ascoltare la suddetta stazione.

Il segnale da analizzare viene inizialmente filtrato, mediante un filtro analogico passa-basso, onde evitare i classici problemi di aliasing; successivamente, esso viene campionato ad intervalli regolari, fin quando non si riempie un apposito registro in memoria. Una volta riempito tale registro con i campioni del segnale (nel tempo), un sistema a microprocessore esegue i calcoli necessari per l'applicazione della formula della DFT, cioè per convertire i dati nel dominio della frequenza; i

¹ Si pensi, ad esempio, alla stima delle caratteristiche spettrali del **segnale telefonico**: analizzando lo spettro di alcuni segnali ottenuti da conversazioni telefoniche, si vuole risalire alle caratteristiche spettrali generali del segnale telefonico

risultati sono dunque i campioni $X(k)$ dello spettro del segnale, che vengono a loro volta memorizzati in un ulteriore registro, pronti ad essere visualizzati sullo schermo di un CRT oppure sottoposti a successive elaborazione (ad esempio la demodulazione di cui si parlava prima, nel qual caso il processo di riempimento della memoria e calcolo della DFT è di tipo dinamico, nel senso che vengono coinvolti campioni sempre nuovi del segnale $x(t)$ di partenza).

Volendo disegnare uno schema a blocchi un po' più specifico, dovremmo usare qualcosa di molto simile allo schema a blocchi di un oscilloscopio digitale (entrambi sono strumenti a logica cablata). In più, rispetto a questo, possiamo citare le seguenti novità:

- un convertitore ADC che, pur avendo generalmente la stessa velocità di quello usato in un oscilloscopio, possiede una risoluzione decisamente più alta (**12-14 bit** contro gli 8 bit tipici degli oscilloscopi);
- un processore dedicato all'esecuzione della DFT (o, meglio, della FFT) e degli algoritmi basati su di essa (ad esempio per il calcolo del valore efficace delle singole armoniche oppure del "tappeto" di rumore oppure per il calcolo della distorsione armonica);
- una serie di componenti che consentono la visualizzazione sullo schermo dell'ampiezza (eventualmente anche in dB) del contenuto armonico del segnale in funzione della frequenza;

Un analizzatore di spettro può essere predisposto per funzionare in due modi:

- **in banda base**, viene visualizzato lo spettro partendo dalla componente continua ed arrivando fino alla massima frequenza imposta dalla banda dello strumento stesso;
- **in banda selezionata**, invece, si può evidenziare lo spettro in una banda di frequenza ristretta.

Come detto prima, l'esito dell'applicazione della DFT è sostanzialmente un vettore di campioni $X(k)$ che rappresentano lo spettro del segnale sotto misura; quest'ultimo può essere espresso sia in termini di modulo e fase sia in termini di parte reale e parte immaginaria. Dallo spettro è poi anche possibile risalire alla **densità spettrale di potenza** del segnale (sempre in forma campionata): si tratta anche qui di ampiezze in funzione della frequenza, ottenute in particolari dal prodotto $X(k) \cdot X^*(k)$ tra gli elementi del vettore $X(k)$ e i rispettivi complessi coniugati. La densità spettrale di potenza di un segnale è molto utile in quanto la sua antitrasformata corrisponde alla funzione di autocorrelazione del segnale stesso. Non solo, ma, attivando due canali dell'analizzatore e acquisendo due segnali $x(t)$ e $z(t)$, è possibile risalire alla funzione di mutua correlazione tra di essi con procedimento analogo al precedente, salvo a considerare il prodotto $X(k) \cdot Z^*(k)$ tra ciascuna componente armonica del primo ed il complesso coniugato della corrispondente armonica dell'altro.

Quando si esegue l'analisi in frequenza di un segnale tramite la DFT, ci sono due requisiti cui prestare molta attenzione:

- **risoluzione in frequenza:** vale $\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t}$, dove **N** è il numero di campioni prelevati nel tempo e Δt è il passo di campionamento nel tempo, e corrisponde alla minima distanza alla quale si devono trovare due righe spettrali per poter essere individuate come distinte; in altre parole, la risoluzione in frequenza definisce la capacità di un analizzatore di separare linee spettrali adiacenti, in modo che esse possano essere osservate in modo singolo. In base all'espressione riportata, Δf è tanto più piccola (quindi tanto migliore) quanto maggiore è il numero **N** di campioni che riusciamo a prelevare e quanto maggiore è il periodo di campionamento Δt ; di conseguenza, essa è limitata dalle capacità di memoria dello strumento e

dalla massima frequenza di campionamento. Nel caso di segnali periodici, si può verificare che, per migliorare la risoluzione in frequenza, bisogna campionare un numero quanto più alto possibile di periodi del segnale, il che però contrasta ovviamente con l'esigenza di elaborazione in tempo reale. Nei migliori analizzatori, è presente un tasto AUTO per la selezione automatica della migliore risoluzione: quando il valore minimo ottenuto per Δf non risulti sufficiente per la separazione delle righe spettrali adiacenti, compare una indicazione di errore²;

- **dispersione spettrale:** come è noto, questo parametro è legato essenzialmente al fatto che il segnale temporale $x(t)$ viene troncato per effetto della limitata finestra di osservazione. Questo troncamento produce effetti sullo spettro che viene fuori dalla DFT e che non coinciderà mai con lo spettro vero del segnale: infatti, il troncamento del segnale equivale alla convoluzione dello spettro $X(f)$ con lo spettro $W(f)$ del rettangolo corrispondente alla finestra di troncamento, per cui la DFT fornisce una versione campionata non di $X(f)$, ma di $X(f)*W(f)$; questa convoluzione comporta che l'energia di $X(f)$, inizialmente confinata in una precisa banda di frequenza, risulti in realtà "spalmata" su una banda maggiore e questo a causa dei lobi secondari da cui è composto lo spettro $W(f)$. Si parla, infatti, di **leakage spettrale**, ossia appunto di dispersione dell'energia su frequenze alle quali, invece, essa era inizialmente nulla. Questa dispersione inficia, evidentemente, l'accuratezza dei risultati, in quanto causa una alterazione delle righe spettrali relative alle frequenze presenti nel segnale acquisito, per cui va minimizzata: il metodo migliore di minimizzazione consiste nello scegliere una finestra di troncamento che non sia rettangolare, cioè con discontinuità brusche agli estremi, ma più dolce, in modo che i lobi secondari del suo spettro decrescano a zero più rapidamente e quindi diano luogo ad un minore effetto di leakage dell'energia. Esiste una gran varietà di finestre usate negli analizzatori digitali di spettro, tra cui citiamo quelle di Hanning, di Hamming, di Kaiser e le cosiddette flat-top, che presentano il lobo principale estremamente piatto in sommità.

I problemi maggiori, nell'uso degli analizzatori digitali di spettro, vengono dal fatto che la risoluzione in frequenza e la dispersione spettrale sono requisiti in contrasto tra loro, nel senso che migliorare uno di essi comporta sicuramente un peggioramento dell'altro. Bisogna perciò sempre trovare delle condizioni di compromesso tra opposte esigenze.

Strumenti per segnali digitali

INTRODUZIONE

Una categoria particolare di strumenti digitali sono quelli che servono specificamente per l'analisi di segnali digitali (quindi tipicamente di onde quadre). Questi strumenti presuppongono perciò che i propri ingressi siano già intrinsecamente digitali, il che significa che non prevedono al loro interno alcun ADC. Si tratta del **contatore universale**, dell'**analizzatore di stati logici** e dell'**analizzatore di firma**.

² E' bene sottolineare la differenza tra la risoluzione in frequenza e l'indicazione FREQ SPAN/div sul pannello dello strumento: quest'ultima, infatti, indica semplicemente la suddivisione della scala in frequenza dello strumento.

CONTATORE UNIVERSALE

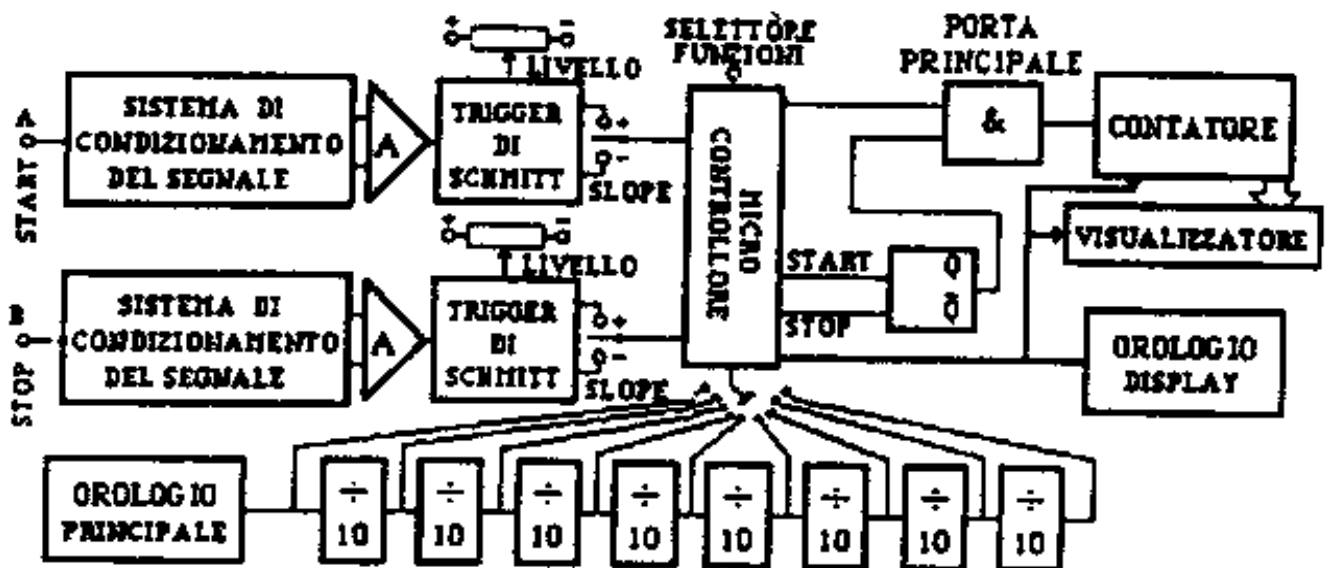
Il contatore universale è uno strumento digitale con due grossi pregi: presenta una elevatissima accuratezza e può misurare, oltre al tempo ed alla frequenza, una serie di altre grandezze convertite o comunque riconducibili a misure di tempo.

*L'elevatissima accuratezza nelle misure di tempo e frequenza è legata fundamentalmente al particolare tipo di **orologio interno** impiegato nello strumento:* valori massimi di accuratezza sono dell'ordine di 1 parte in 10^{14} , mentre valori medi sono dell'ordine di 1 parte su 10^8 .

Un contatore universale è costituito essenzialmente a 5 blocchi:

- una **sezione di ingresso**, dedicata fundamentalmente al condizionamento del segnale prima delle varie elaborazioni;
- una **porta principale** (la classica porta AND), attraverso la quale passano impulsi da contare (esattamente come visto in precedenza nei dispositivi ADC);
- una **unità di conteggio decimale** (brevemente **DCU**), con accluso **visualizzatore numerico**;
- un **circuito base tempi**, formato da un **orologio** e da un **divisore a decadi**;
- un **microprocessore**, con compiti sia di controllo sia di selezione delle diverse funzioni (secondo quanto definito dall'operatore tramite i comandi sul pannello esterno).

La figura seguente mostra uno schema a blocchi semplificato di un contatore universale, in cui sono evidenziati i 5 blocchi appena elencati:



Sezione di ingresso

La sezione di ingresso del dispositivo è costituito in genere da due canali identici (canale A e canale B); per ciascun canale, è presente un **sistema di condizionamento** che deve sostanzialmente adattare il segnale agli stadi successivi: ad esempio, bisogna fare in modo che i segnali siano convertiti in forme compatibili con i circuiti logici presenti a valle, nella sezione del microprocessore.

Il suddetto sistema di condizionamento è costituito dalla cascata dei seguenti stadi:

- un **connettore di ingresso** con l'opzione **c.c.** o **c.a.** per l'accoppiamento del segnale: l'opzione c.a., come è noto, serve ad eliminare l'eventuale componente continua presente nel segnale;
- un **attenuatore automatico**;
- un **amplificatore a guadagno variabile** con adattatore di impedenza;
- un **circuito di Schmitt** per la squadratura del segnale, con inclusa la possibilità (così come negli oscilloscopi) di regolare manualmente sia il livello sia la pendenza dell'impulso di trigger;
- un **filtro passa-basso** (non sempre presente) con frequenza di taglio variabile.

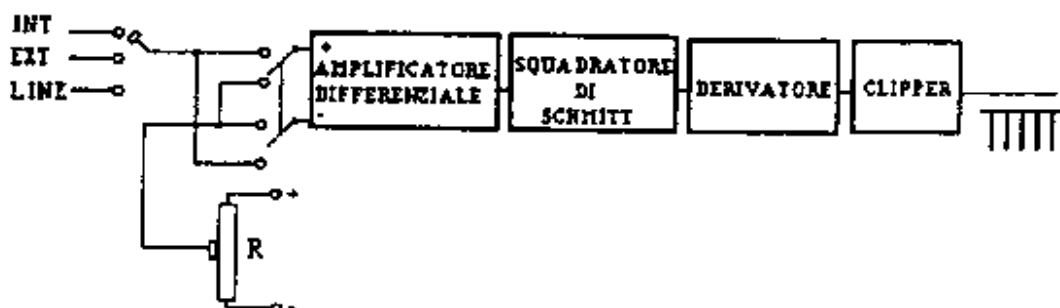
Il segnale sotto misura può essere utilizzato in due modi distinti, a seconda del tipo di misura che si vuole effettuare:

- la prima possibilità è di convertirlo in una **serie di impulsi** che dovranno poi essere contati dal contatore decimale: questo accade per le misure di frequenza;
- la seconda possibilità (applicata nel caso di misure di periodo) è invece di convertirlo in una **finestra di osservazione**, che dovrà delimitare il tempo durante il quale il contatore dovrà contare degli impulsi provenienti dall'orologio interno.

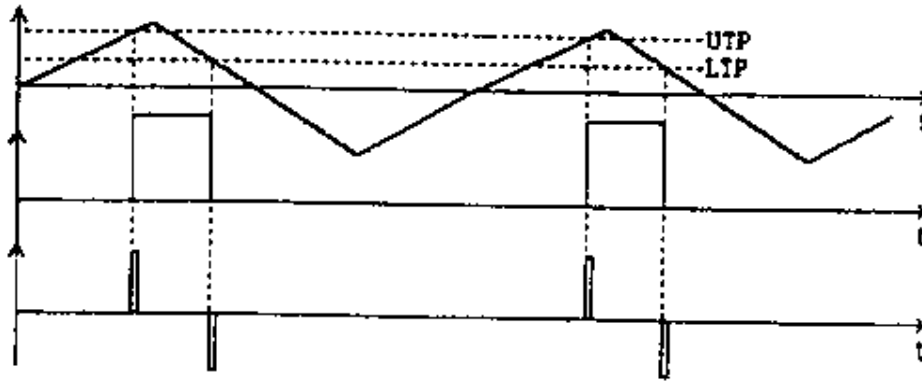
Finestra di scatto

Il segnale di ingresso è quasi sempre affetto da rumore; per ridurre anche notevolmente l'influenza di tale rumore, si usa proprio il circuito di Schmitt, che squadra il segnale prima di inviarlo agli stadi successivi.

L'effetto filtrante del circuito di Schmitt è reso ancora più efficace dalla possibilità di variare l'ampiezza della cosiddetta **finestra di scatto**: si tratta della distanza tra i punti di trigger superiore (UTP) e inferiore (LTP). A tal proposito, ricordiamo quanto visto in precedenza, nella parte sull'oscilloscopio, a proposito del **circuito di scatto** (che pilota il generatore della base tempi) e di UTP e LTP:



Schema a blocchi del circuito di scatto di un oscilloscopio



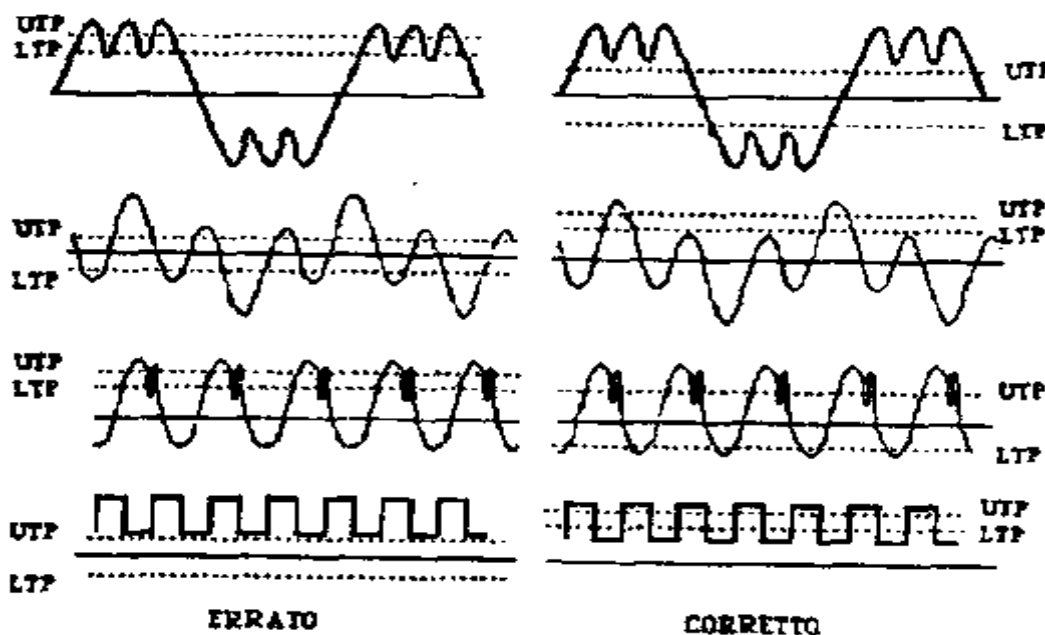
Esempio di generazione degli impulsi di trigger, in presenza di un segnale ad onda triangolare

Gli impulsi di trigger sono ottenuti ricavando, dal segnale sotto misura, prima una successione di impulsi rettangolari (in uscita dallo squadratore) e poi una successione di impulsi molto stretti (si tratta degli impulsi positivi oppure negativi in uscita dal derivatore, selezionati dal circuito clipper).

Allora, l'**UTP** (*Upper Trigger Point*) è il punto in cui parte il fronte di salita in uscita dallo squadratore (ed il corrispondente impulso positivo dal derivatore), mentre l' **LTP** (*Lower Trigger Point*) è il punto in cui parte il fronte di discesa in uscita dallo squadratore (ed il corrispondente impulso negativo dal derivatore).

Nel caso del contatore universale, il problema nasce dal fatto che eventuali oscillazioni del segnale sotto misura, dovute al rumore, possono far nascere degli impulsi spuri in uscita dal circuito squadratore, il che porterebbe ad errori di conteggio. Come si deduce dall'ultima figura, le suddette oscillazioni creano impulsi spuri solo quando hanno ampiezza superiore a quella della *finestra di scatto*. Allora, qualora si noti la presenza di tali impulsi spuri (ad esempio perché l'indicazione numerica sul visualizzatore risulta instabile), basta aumentare l'ampiezza della finestra di scatto ad un valore opportuno.

Per comprendere ulteriormente il concetto, riportiamo nella figura seguente 4 distinti segnali periodici, illustrando quali siano le scelte corrette ed errate dei valori dell'UTP e dell'LTP:

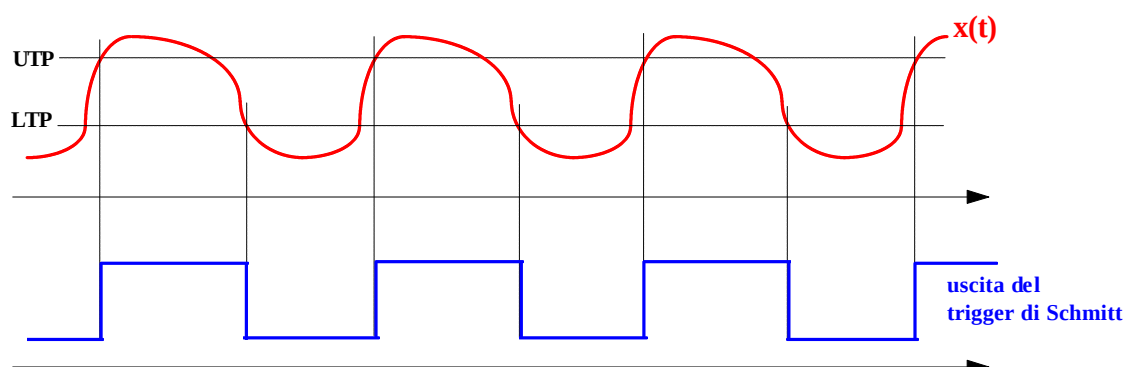


Il primo segnale considerato è una specie di onda quadra: in particolare, esso si ottiene considerando solo le prime armoniche (dispari) che compongono lo spettro di un'onda quadra. Per avere sempre lo stesso punto di trigger, è necessario che rendere innocue le oscillazioni di piccola ampiezza, per cui viene mostrata la scelta più corretta per UTP ed LTP. Analogo discorso viene fatto evidentemente negli altri casi.

Segnaliamo che, in alcuni strumenti, la variazione di UTP ed LTP è automatica, ma comunque è sempre possibile una variazione manuale, tramite appositi comandi sul pannello frontale (come nel caso degli oscilloscopi).

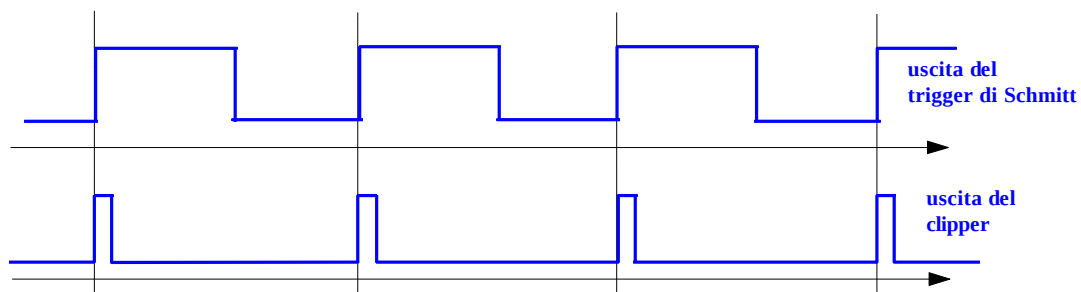
Microprocessore e porta principale

Abbiamo dunque detto che il segnale sotto misura viene squadrato dal trigger di Schmitt, come indicato nella figura seguente:



Il segnale squadrato viene dunque inviato al **microprocessore**, il quale deve determinare, a seconda della funzione impostata dall'operatore, che tipo di segnale deve inviare alla **porta principale**:

- misura di frequenza: in questo caso, lo scopo della misura è contare quanti periodi dell'ingresso squadrato cadono all'interno di una finestra di osservazione generata mediante l'orologio del sistema; allora, l'ingresso quadrato passa attraverso un **derivatore** ed un **clipper** (come illustrato poco fa), in modo da ricavare una serie di impulsi di breve durata distanziati tra loro di un tempo pari al periodo del segnale da misurare:



La successione di impulsi stretti così ottenuta viene mandata in ingresso alla porta AND; l'altro ingresso della porta è appunto il segnale generato dal clock: in tal modo, fin quando il clock è al livello alto (il che accade durante la **finestra di osservazione** di durata T_W), gli impulsi stretti passano attraverso la porta e possono quindi essere contati;

- misura di periodo: in questo caso, si procede dualmente rispetto a prima, nel senso che si conta il numero di periodi di clock che cadono in un periodo dell'ingresso squadrato; quindi, l'ingresso squadrato non riceve ulteriori trattamenti e viene mandato direttamente in ingresso alla porta AND, il cui ulteriore ingresso è pilotato dal clock: fin quando il segnale squadrato è al livello alto, gli impulsi del clock passano attraverso la porta e vengono contati.

Riguardo le misure di frequenza, è opportuno sottolineare che è proprio il trigger di Schmitt, a causa del tempo finito di commutazione necessario per passare da uno stato all'altro, a determinare la massima frequenza misurabile.

Anche la porta principale AND impone delle limitazioni in frequenza, dovute al tempo necessario per il passaggio degli impulsi da contare dall'ingresso all'uscita della porta stessa. Tuttavia, utilizzando porte della **famiglia logica ECL**, si ottengono **tempi di passaggio** molto brevi e quindi non limitanti.

La **massima frequenza misurabile** tramite un contatore universale è intorno al **GHz**. Per andare oltre (circa 10 GHz), è necessario ricorrere ad un convertitore ad eterodina, similmente a quanto visto per gli analizzatori analogici di spettro.

Unità di conteggio decimale (DCU)

A valle della porta principale è sistemata la circuiteria necessaria al conteggio vero e proprio. Si tratta di una serie di **contatori a decadi**, ciascuno relativo ad una cifra del visualizzatore.

Come è noto da corsi precedenti, *un contatore è un circuito logico sequenziale che conta gli impulsi di clock*; per effettuare questo conteggio, un contatore è fatto in modo che ad ogni nuovo impulso di clock la sua uscita assuma una configurazione diversa: molto semplicemente, l'uscita è un numero binario che rappresenta il numero d'ordine dell'ultimo impulso di clock. Ogni contatore, per evidenti motivi, ha un numero massimo di impulsi di clock conteggiabili: questo numero è il cosiddetto **modulo** del contatore ed è usato appunto per distinguere un contatore da un altro: nei cosiddetti *contatori binari*, il modulo è sempre una potenza di 2, mentre, nel nostro caso, abbiamo **contatori a decade** (detti anche *contatori BCD*), dove cioè il modulo è 10 oppure un suo multiplo.

Per realizzare un contatore a decade, servono notoriamente 4 flip-flop³. I contatori sono in cascata tra loro, in modo che, quando il primo contatore ha contato 9 impulsi, trasmette un riporto al contatore successivo, rappresentativo della cifra di un ordine di grandezza superiore al precedente. Con questo meccanismo, si possono contare unità, decine, centinaia, migliaia e le cifre via via superiori.

Ogni contatore è seguito da una registro oppure da una vera e propria memoria, comandata dall'orologio del display. Quando il conteggio è terminato, le cifre sono trasferite nelle memorie relative ad ogni contatore. Segnaliamo inoltre che il contenuto di una memoria viene modificato solo se, nel successivo conteggio, varia la cifra contata dal contatore corrispondente; questo serve a non variare continuamente le cifre del visualizzatore, almeno fin quando cambiano.

Ogni unità di memoria corrispondente ad una decade di conteggio serve a pilotare, tramite un **decodificatore**⁴, un visualizzatore a 7 segmenti per ogni cifra.

Nella maggior parte dei contatori universali, è disponibile anche un'uscita digitale per il collegamento ad una stazione di misura oppure ad un sistema di registrazione digitale dei dati.

³ Dato, però, che 4 FF consentono di contare fino a 16 impulsi di clock (numerandoli da 0 a 15), è previsto un circuito che, al 10° impulso, azzeri il contenuto del contatore e gli faccia riprendere il conteggio nuovamente da 0.

⁴ Si tratta chiaramente di un decodificatore da BCD a 7 segmenti

Orologio principale

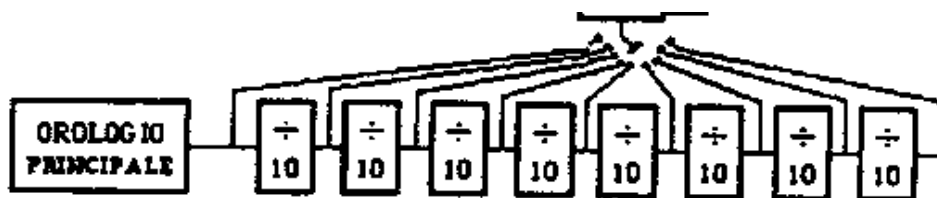
Come detto in precedenza, *l'accuratezza di un contatore universale dipende strettamente dalle caratteristiche dell'orologio principale*. Questo deve essere quindi molto accurato e deve inoltre presentare elevata stabilità. A tal fine, si usano **oscillatori quarzati**, che però sono molto sensibili alla temperatura, all'invecchiamento ed alle variazioni della tensione di alimentazione.

In genere, la frequenza degli oscillatori al quarzo varia tra 1 MHz e 10 MHz ed è questo il campo in cui essi forniscono le migliori prestazioni.

Per minimizzare l'influenza della temperatura, si ricorre ad **oscillatori compensati in temperatura** (brevemente **TCXO**): la compensazione avviene usando un ulteriore oscillatore al quarzo, soggetto alle stesse variazioni di temperatura di quello principale, ma agente sulla frequenza in senso opposto; in tal modo, un aumento di frequenza dovuto all'effetto della temperatura sull'oscillatore principale viene compensato da una diminuzione imposta dall'oscillatore secondario e viceversa.

Nei contatori da 4 a 6 cifre, i TCXO non vengono usati, mentre sono indispensabili per contatori da 6 a 7 cifre. Nei contatori da 7 a 9 cifre, inoltre, viene usato un sistema di controllo della frequenza e di stabilizzazione della frequenza, in modo da migliorare ulteriormente l'accuratezza.

L'oscillatore al quarzo è poi seguito da una serie di **divisori per 10**:



Si tratta anche qui di contatori a decade, ciascuno dei quali permette di ridurre la frequenza di un fattore 10. In questo modo, è possibile avere dei riferimenti temporali in un ampio campo di valori.

Conteggio di impulsi

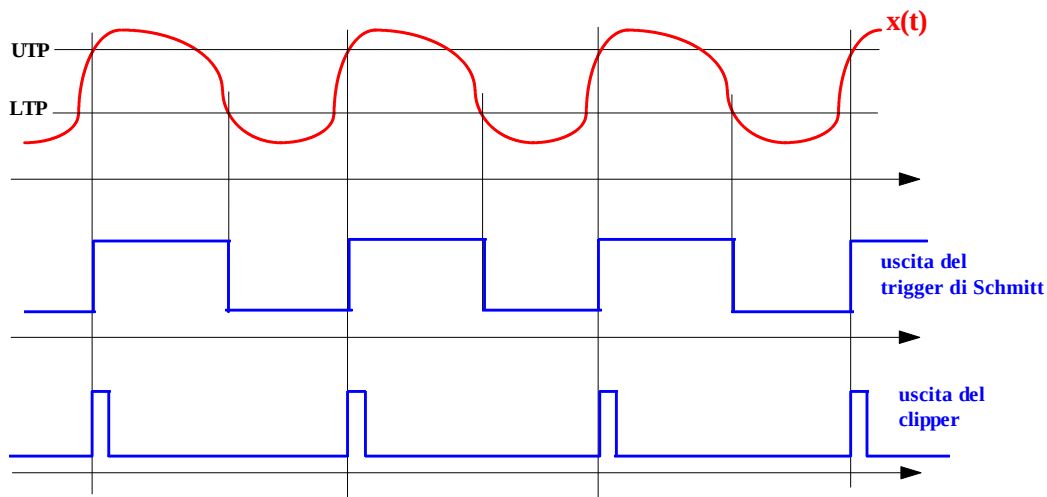
Cominciamo adesso a vedere che tipo di misure possiamo compiere tramite un contatore di impulsi.

Conviene cominciare con il **conteggio di impulsi** (che, per esempio, possiamo pensare associati ad una serie di eventi non meglio identificati). In questo caso, uno degli ingressi della porta principale consiste in un livello alto di tensione, costante e proveniente dal microcontrollore, mentre all'altro ingresso arrivano direttamente gli impulsi da contare (provenienti dall'esterno). Questi impulsi da contare possono eventualmente passare attraverso ulteriori divisori, in modo da essere contati non più singolarmente ma a due a due oppure a dieci a dieci e così via usando divisori via via maggiori.

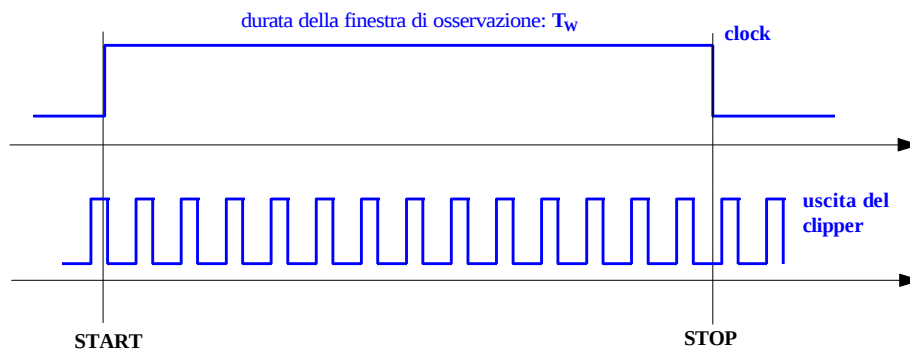
Una tipica applicazione è quella di un **tachimetro digitale**: abbiamo un disco calettato solidalmente ad un albero in rotazione e lo scopo è quello di contare la velocità di rotazione; a tal fine, sul disco sono praticati dei fori (in numero prestabilito, ad esempio 60 se si vuol misurare la velocità in giri/min) equispaziati lungo la corona circolare esterna. Una cellula fotoelettrica, sfruttando l'alternanza foro-pieno che si verifica durante la rotazione del disco, pilota un circuito elettrico, che genera degli impulsi; il conteggio di tali impulsi permette, in base al numero di fori praticati sul disco, la misura del numero di giri al secondo o al minuto compiuti dall'albero in rotazione.

Misura di frequenza

Come già detto in precedenza, la misura di frequenza avviene contando il numero di cicli del segnale (squadro) di ingresso all'interno di un intervallo di tempo noto e controllato con grande accuratezza. Tramite il circuito di Schmitt, il segnale sotto misura è convertito in una serie di impulsi che si susseguono ad una distanza pari al periodo del segnale



Gli impulsi sono inviati, tramite il microcontrollore, alla porta principale; l'altro ingresso di questa è pilotato da un livello alto di tensione continua, di durata bene definita T_w , proveniente dalla base dei tempi. In tal modo, passano attraverso la porta solo gli impulsi di ingresso presenti nell'intervallo T_w :



Se N è il numero di impulsi contati nel tempo T_w , è evidente che vale *approssimativamente* la relazione $NT_x = T_w$, per cui la frequenza f_x del segnale in ingresso è

$$f_x = \frac{N}{T_w}$$

Il motivo per cui diciamo approssimativamente sarà spiegato più avanti, ma è abbastanza intuitivo: si tratta dell'*errore di conteggio* già citato in precedenza per i DVM ed i DMM, ossia del fatto che il contatore potrebbe contare un impulso n più o in meno a seconda della sincronizzazione con il clock. Su questo aspetto comunque torneremo.

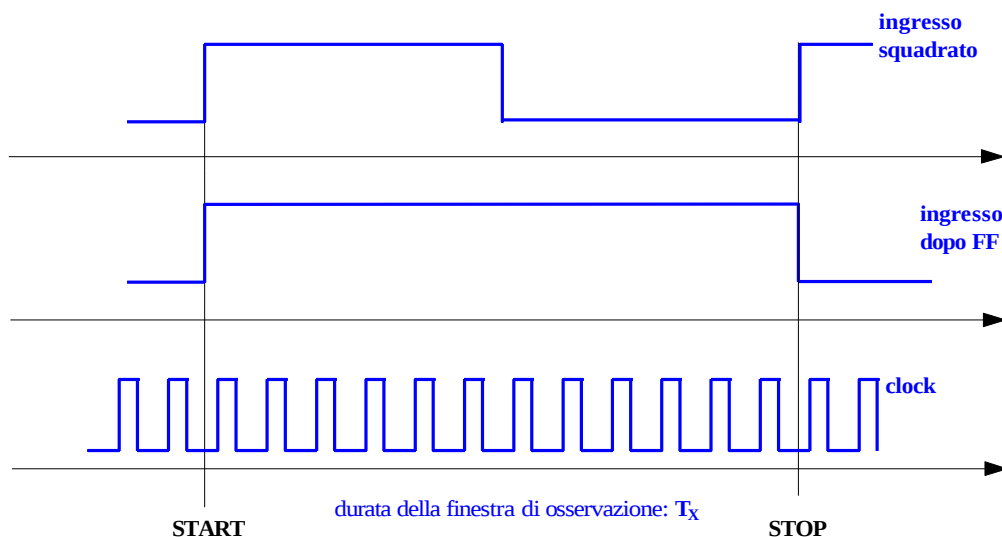
Oltre a misurare la frequenza di un segnale, il contatore universale può anche misurare il rapporto tra due frequenze, nel qual caso l'orologio interno non serve. Infatti, si applicano in ingresso allo strumento i due segnali a differente frequenza; il segnale a più bassa frequenza, f_B , va sul canale B: esso viene squadrato e poi usato per azionare la porta principale, sostituendo perciò la funzione della base tempi; l'altro segnale, sul canale A, viene invece *trattato* nel modo convenzionale, ossia

squadrato e convertito in una serie di impulsi alla stessa frequenza della fondamentale f_A . A questo punto, la DCU conterà il numero di cicli del segnale A durante uno o più periodi del segnale B (se si usano più periodi di B, bisognerà prendere 10 o un suo multiplo). Nel caso di usi un solo periodo del segnale B, risulterà evidentemente

$$f_A = \frac{N}{T_B} \longrightarrow \boxed{\frac{f_A}{f_B} = N}$$

Misura di periodo

Per effettuare una misura di periodo, basta considerare che il periodo è l'inverso di una frequenza, per cui, rispetto alla misura di frequenza, basta invertire i due ingressi della porta principale: come detto in precedenza, il segnale di ingresso, dopo la squadratura, serve ad abilitare il conteggio, che avverrà in un tempo T_X pari al periodo del segnale stesso; durante questo tempo, la porta AND è attraversata dagli impulsi provenienti dalla base tempi, ad una frequenza di ripetizione $1/T_W$ ben nota:



Da notare che la finestra di osservazione è definita non dall'ingresso squadrato, ma da ciò che si ottiene mandando tale ingresso attraverso un flip-flop: è infatti quest'ultimo che genera un livello alto costante di tensione della durata pari al periodo T_X del segnale in ingresso.

Il numero N di impulsi contati nel periodo T_X è *approssimativamente* $\frac{T_X}{T_W} = N$, da cui ricaviamo che

$$\boxed{T_X = NT_W}$$

Anche in questo caso, l'approssimazione deriva dall'errore di conteggio, anche se vedremo che l'errore è maggiore in questo caso rispetto a quello della misura di frequenza.

Misure di tempo generiche

Nell'ambito delle misure di tempo, si possono misurare altre quantità oltre il periodo di un generico segnale oppure anche il ritardo tra due segnali. In base al tipo di misura da eseguire, i segnali in ingresso ai due canali dello strumento svolgeranno funzioni differenti.

Consideriamo ad esempio la misura di ritardo tra due eventi, che sfrutta i concetti relativi alla misura di periodo descritta poco fa:

- per prima cosa, bisogna convertire i due eventi in segnali che, attraverso i canali A e B, fungono da comandi di START (il primo evento) e di STOP (il secondo evento) per la porta principale;
- nell'intervallo di tempo ΔT_x compreso tra lo START e lo STOP, vengono contati gli impulsi, a frequenza di ripetizione nota, provenienti dalla base tempi;
- a questo punto, se N è il numero di impulsi contati nel tempo ΔT_x , avremo evidentemente che

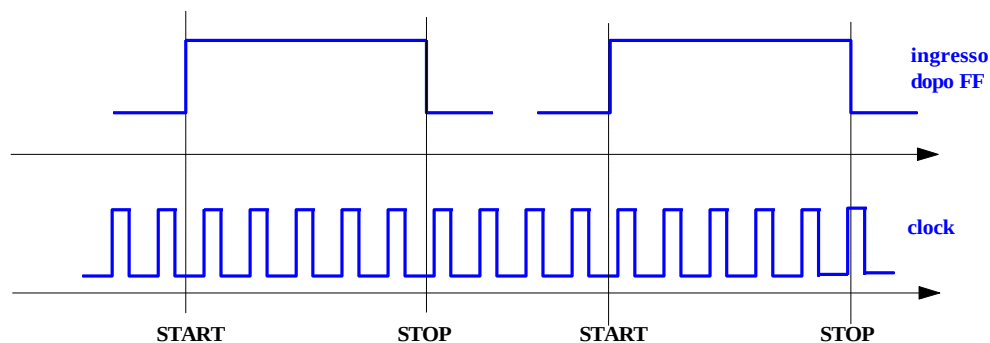
$$\Delta T_x = \frac{N}{f_w} = NT_w$$

Accuratezza e risoluzione

Come anticipato, anche il contatore universale presenta diverse cause di errore, che possono essere raggruppate in quattro categorie:

- **errore di conteggio ± 1** (detto anche *errore di porta*);
- **errore relativo alla base tempi;**
- **errore di scatto;**
- **errori sistematici.**

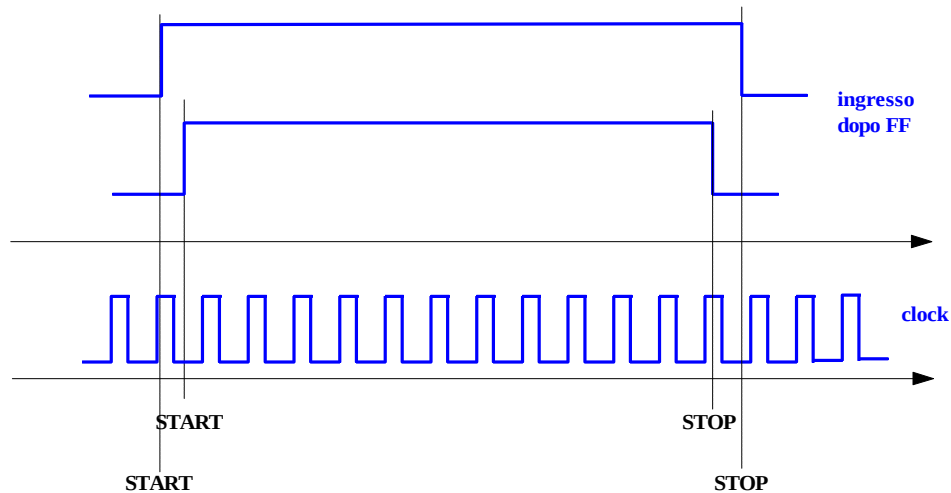
L'**errore di conteggio**, come si è già detto per i DVM e i DMM, è presente in tutti gli strumenti digitali che si basano sul conteggio di impulsi. Esso è dovuto alla mancanza di sincronizzazione tra i due segnali applicati alla porta principale⁵. Per comprenderlo a pieno, consideriamo la misura di periodo:



Nel caso si effettuino misure successive, la mancanza di sincronizzazione fa' sì che il clock sia, in generale, collocato in modo diverso rispetto alla finestra temporale ricavata dal segnale in ingresso, come risulta chiaro dalla figura: infatti, nell'esempio considerato si vede che, se il conteggio avviene in base al numero di fronti di salita del clock, nel primo caso ce ne sono 5, mentre nel secondo ce ne sono 6. In questo caso particolare, abbiamo dunque una incertezza di misura sul periodo di $\pm \frac{1}{2}$ periodo di clock.

⁵ Il segnale da misurare ed il clock sono evidentemente indipendenti tra loro, per cui sono anche non sincronizzati

In realtà, ci possiamo convincere facilmente che l'errore totale di conteggio è pari a ± 1 periodo di clock. Consideriamo infatti due finestre temporali, tali che al loro interno cada lo stesso numero di fronti di salita del clock:



L'errore di ± 1 periodo può essere visto come due distinte somme:

- la prima possibilità è quella di sommare l'errore di conteggio ($\pm \frac{1}{2}$ periodo) e l'errore di quantizzazione ($\pm \frac{1}{2}$ periodo);
- la seconda possibilità è quella di sommare due errori (entrambi di $\pm \frac{1}{2}$ periodo) legati alla localizzazione degli istanti di START e STOP.

L'errore di conteggio è ineliminabile e rende perciò non deterministico il comportamento dello strumento. Anche in presenza di un ingresso di periodo rigorosamente costante, il conteggio effettuato sarà N o $N+1$ in modo del tutto casuale, il che corrisponde ad una incertezza di ± 1 LSB. Da qui consegue che, per costruire uno strumento che in assenza di rumore dia un risultato fisso, il bit meno significativo deve essere eliminato (dato che non dà alcuna reale informazione sull'ingresso): così facendo, l'errore totale di conteggio coincide con la risoluzione; in caso contrario, l'errore totale è il doppio della risoluzione, in quanto l'ultimo bit (LSB) è inutile.

A fronte di queste considerazioni, è evidente che, trattandosi di un errore assoluto, quando passiamo all'errore relativo (dividendo per N) esso diminuisce all'aumentare del numero N di impulsi contati. Di conseguenza, tenendo conto che $\frac{T_x}{T_w} = N$, deduciamo che le misure di periodo

tramite contatore universale vanno effettuate quando il segnale sotto misura ha periodo molto maggiore di quello del clock interno. Detto in altre parole, *le misure di periodo sono opportune per segnali in bassa frequenza, mentre, per i motivi duali, le misure di frequenza sono opportune per segnali in alta frequenza.*

E' importante notare che l'errore di conteggio è presente anche nella misura di frequenza, dove però esso vale $\pm \frac{1}{2}$ periodo del segnale.

Per quanto riguarda, invece, l'**errore relativo alla base tempi**, esso è legato alle incertezze nella frequenza di ripetizione degli impulsi o nei comandi di START e STOP. Questi errori sono perciò legati essenzialmente alle fluttuazioni della frequenza dell'oscillatore principale rispetto alla frequenza nominale di taratura. Con opportuni meccanismi di controllo, queste cause di errore possono essere minimizzate.

Va considerato inoltre l'**errore di scatto**, legato questa volta alle oscillazioni indesiderate del segnale in ingresso, dovute al rumore, che possono provocare impulsi spuri. Come detto in precedenza, tali impulsi possono essere eliminati regolando in modo opportuno l'LTP e l'UTP; è inoltre presente, in alcuni strumenti, un filtro passa-basso, che elimina eventuali componenti di rumore in alta frequenza prima che il circuito di Schmitt operi la squadratura del segnale.

In aggiunta a questo, bisogna anche considerare il rumore generato internamente dal contatore, che potrebbe determinare l'apertura indesiderata della porta principale. Elevando i costi, è possibile d'altra parte usare componenti logici praticamente immuni da errori. Non solo, ma, tenendo conto che si tratta in ogni caso di errori casuali, possiamo aumentare la precisione compiendo misure successive e poi facendo una media dei risultati ottenuti.

Infine, vanno portati in conto gli errori sistematici, legati essenzialmente ai ritardi nei comandi di START e STOP rispetto al verificarsi degli eventi che li determinano. Tali ritardi dipendono evidentemente dalla non idealità delle linee di interconnessione tra i dispositivi. E' possibile allora aumentare la precisione tramite frequenti azioni di taratura dello strumento.

Si tenga conto, inoltre, del fatto che gli errori sistematici non eliminabili sono comunque sempre indicati dal costruttore nei certificati che accompagnano lo strumento.

ANALIZZATORI DI STATI LOGICI

Data la grande diffusione degli strumenti digitali, è nata l'esigenza di controllarli mediante prove opportuni. Il cattivo funzionamento di un sistema digitale può essere dovuto a varie cause:

- errori dinamici (detti **glitch**);
- salti di bit con omissioni di codice;
- errori nell'orologio e nei diversi circuiti integrati.

Lo strumento più efficiente per l'analisi e la diagnosi di componenti e dispositivi logici è l'**analizzatore di stati logici (LSA, Logic State Analyzer)**.

Prima dell'avvento degli LSA, i primi strumenti usati per individuare i guasti nei circuiti integrati erano le cosiddette **sonde logiche**: una sonda logica invia un impulso attraverso il circuito e poi verifica che livello di tensione risulta presente in uscita al piedino in prova.

La sonda ha al suo interno una **soglia logica** variabile con valori di 2V e 0.8V, che corrispondono ai livelli alto e basso dei circuiti logici TTL e DTL. La sonda è collegata, tramite il suo **puntale**, sul piedino in osservazione: a seconda del livello di tensione alto o basso o errato, c'è una **luce spia** che, rispettivamente, si illumina intensamente o rimane spenta o si illumina debolmente.

Oltre alle sonde logiche, sono anche disponibili dei piccoli ed economici strumenti di diagnosi di circuiti integrati in TTL o DTL, detti **Logic clip**: questi strumenti si pressano sul circuito integrato (sono predisposti in genere per 14 o 16 piedini) e mostrano lo stato di ciascun piedino attraverso un singolo LED: l'accensione o lo spegnimento del LED indica un livello rispettivamente alto o basso della tensione sul piedino corrispondente.

Verso gli anni Settanta, hanno cominciato ad apparire i primi **LSA**, che erano sostanzialmente degli oscilloscopi analogici speciali a più ingressi. Attualmente, invece, gli LSA sono sofisticati strumenti logici con visualizzazione multicanale, elaborazione autonoma, controllo a microprocessore.

Al contrario degli oscilloscopi digitali, gli LSA non hanno ingressi di tipo BNC: di solito, sono presenti ancora delle **logic clip** che si possono *pinzare* sui piedini dei circuiti integrati

In un LSA non è presente alcun dispositivo ADC in senso stretto: infatti, per analizzare l'andamento di una forma d'onda digitale è sufficiente semplicemente un comparatore, che può

essere visto banalmente come un ADC ad un bit. Sullo schermo di un LSA sono visibili quindi molte **onde quadre idealizzate**, che possono essere elaborate dal processore interno in vario modo.

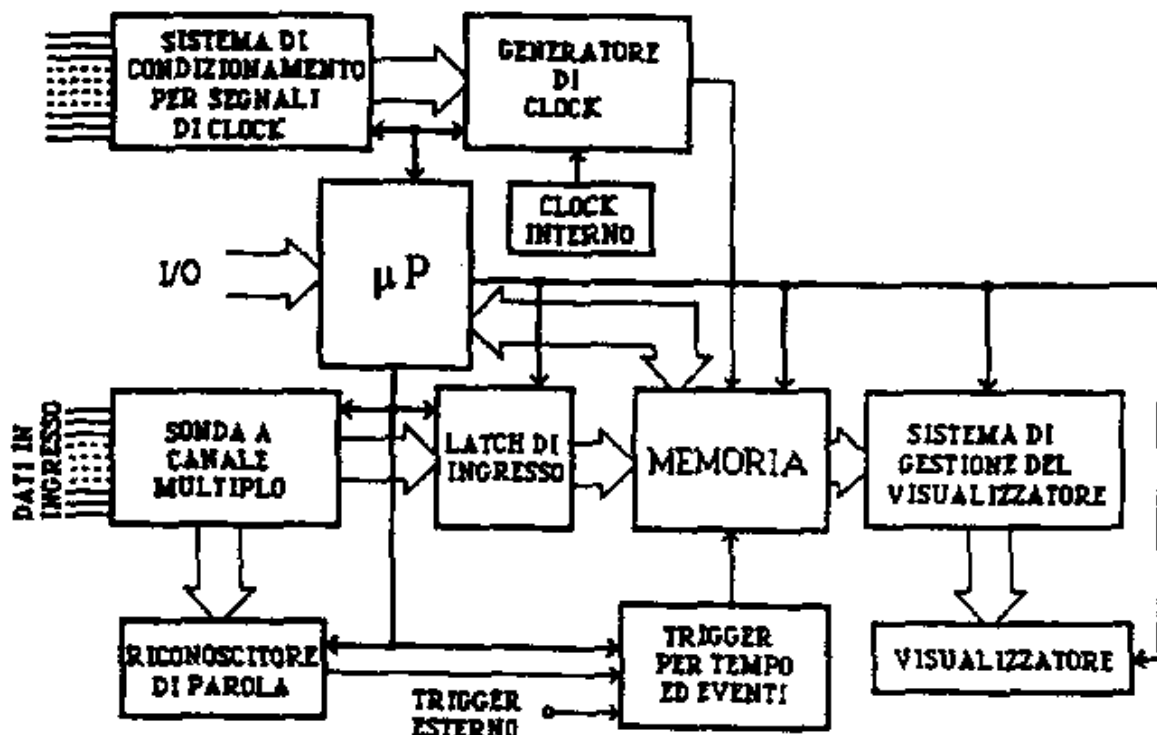
Tramite un LSA è possibile controllare bit, parole binarie, indirizzi, istruzioni e programmi: si può seguire l'evoluzione temporale degli stati logici oppure si può esaminare la struttura definita di sequenze di dati. Si conduce, in ogni caso, una **analisi multinodale**, nel senso che si analizzano contemporaneamente i flussi di bit su più nodi del circuito in esame: questo è consentito dal fatto che un LSA presenta un numero di canali di ingresso variabile generalmente tra 30 ed 80 (talvolta anche 100). Quest'ultima considerazione mostra chiaramente come non sia pensabile usare un oscilloscopio per effettuare lo stesso tipo di analisi, dato il limitatissimo numero di canali di cui dispone tale strumento.

La struttura complessiva di un LSA è concettualmente molto semplice (anche se la realizzazione pratica è decisamente complessa, come del resto l'uso). Un LSA può infatti considerarsi costituito da 3 blocchi principali:

- un sistema di acquisizione dei dati;
- un sistema di sincronizzazione;
- un sistema di elaborazione e visualizzazione.

In base a questa suddivisione, esso assomiglia molto ad un oscilloscopio digitale, anche se da esso differisce per vari fattori, tra cui il maggior numero di canali in ingresso, le finalità di misura e quindi anche il modo con cui i dati vengono internamente elaborati.

La figura seguente mostra uno schema a blocchi semplificato di un LSA:



Notiamo immediatamente due sezioni di ingresso, una per i segnali veri e propri (**dati in ingresso**) ed una per i **segnali di clock**.

Sul pannello frontale dello strumento è presente una manopola che consente di impostare una predefinita **parola binaria di riferimento**. I dati vengono prelevati tramite la **sonda a canale**

multiplo (tanti canali quanti sono i piedini sotto test⁶) ed inviati al **riconoscitore di parola**: questo confronta tali dati con la parole di riferimento; in caso di concordanza, il riconoscitore invia un comando di **trigger**, in modo che da quel momento si dia inizio all'osservazione; questa può consistere nella banale memorizzazione, ma anche in un confronto ripetuto tra le parole che continuano a provenire dall'ingresso e quelle che sono state digitate manualmente.

In pratica, quindi, *dopo il comando di trigger (che, peraltro, potrebbe anche essere esterno), la memoria dello strumento conserva tutti gli stati successivi all'evento di trigger*. Andando ad esaminare le parole disponibili sul visualizzatore, è l'operatore che deve eventualmente rilevare la presenza di anomalie di funzionamento.

Non essendo illimitata, la memoria ha una capacità finita; essa è perciò organizzata in modo sequenziale, nel senso che, a memoria piena, ogni nuovo dato fa perdere il più vecchio degli stati memorizzati. Non solo, ma la memoria può anche essere divisa in due parti, dedicando la prima parte ai dati precedenti l'evento di trigger e la seconda parte ai dati successivi all'evento di trigger. Se le due parti sono uguali, il trigger prende anche il nome di **center**, per ovvi motivi.

La lunghezza di una singola parola immagazzinabile in memoria è pari al numero di canali in ingresso: da ogni canale di preleva 1 bit per volta, in modo da formare la parola da memorizzare. A loro volta, i canali in ingresso sono spesso organizzati in gruppi, detti **pod**.

Il clock del sistema può funzionare in due modi:

- il **modo sincrono** è opportuno quando si vuole condurre una analisi di un programma, nel qual caso è conveniente sincronizzare lo strumento al sistema su cui gira il programma; si parla in questo caso di **analisi di stato** (o *analisi dei dati*);
- il **modo asincrono** è invece più opportuno quando si vuole analizzare una struttura hardware; in questo caso, l'analizzatore opera in base al proprio clock, sganciato temporalmente da quello del sistema in prova. Si parla in questo caso di **analisi temporale**: essa presuppone, evidentemente, che i dati vengono campionati molto frequentemente se si vogliono avere elevate accuratèzze.

Analisi temporale

Nell'analisi temporale, abbiamo dunque detto che l'LSA funziona con il proprio **clock interno**; si tratta di un oscillatore che lavora in genere a **100 MHz**. In ogni caso, questa **frequenza di clock** deve essere da 5 a 10 volte superiore rispetto a quella massima dei segnali da analizzare.

In corrispondenza di ogni periodo di clock, si procedere all'acquisizione di una nuova parola ed alla sua eventuale memorizzazione.

Dato che il sistema "conosce" la frequenza di clock, sul visualizzatore vengono riportati i livelli logici in funzione del tempo. Su questo, però, bisogna intendersi: non viene riportato l'andamento temporale dei segnali, bensì semplicemente una raffigurazione idealizzata dei livelli logici acquisiti.

L'analisi temporale consente di dedurre utili indicazioni circa l'evoluzione dei segnali nei nodi del sistema sotto esame: ad esempio, si possono rilevare i ritardi tra impulsi, la presenza di impulsi spuri, il tempo di durata di un impulso e così via.

Per migliorare l'analisi temporale, ci sono inoltre delle **funzioni aggiuntive**, come l'espansione del diagramma lungo l'asse dei tempi in corrispondenza di una parte del segnale oppure la funzione di ricerca degli errori dinamici.

⁶ Bisogna inoltre fissare la **soglia logica**, ovviamente in base alla famiglia logica utilizzata nel componente digitale in prova, al fine di distinguere un livello alto da uno basso.

Analisi dei dati

In questo caso, abbiamo detto che il clock è esterno e funziona in modo sincrono. La frequenza di successione delle operazioni è generalmente inferiore al funzionamento in asincrono: valori tipici sono quelli compresi tra 25 MHz e 35 MHz.

I segnali che attivano la funzione di clock sono esterni allo strumento, provenienti quasi sempre dal sistema in prova: essi comandano l'acquisizione dei dati quando il segnale assume un valore logico alto o basso oppure quando si ha un fronte di salita o di discesa o per entrambi.

La presentazione dei dati memorizzati nell'analisi di stato può avvenire in diversi modi: quello più semplice consiste in una lista, mentre invece quello più complesso consiste in una mappa da interpretare opportunamente. I dati possono inoltre essere codificati in binario o in ottale (raggruppandoli a gruppi di 3) o in esadecimale (raggruppandoli a gruppi di 4) o perfino in codice ASCII (raggruppandoli a gruppi di 8). Il formato è ovviamente scelto dall'operatore.

Qualificatori

Alcuni LSA hanno dei particolari comandi, detti **qualificatori**, da usare prevalentemente nell'analisi dei dati: essi abilitano e disabilitano l'acquisizione dei dati in ingresso, in modo, per esempio, da selezionare, tra tutti i valori logici assunti dal sistema in prova, solo quelli di interesse (per ottenere questo, l'attivazione e la disattivazione dei qualificatori avviene anch'essa sulla base dei dati in ingresso).

Ulteriori funzioni

Data la complessità di utilizzazione dell'LSA ed allo scopo di valorizzarne tutte le potenzialità, spesso si può programmare e memorizzare le operazioni che esso deve compiere, tramite l'**interfacciamento** dello strumento con un calcolatore.

Nei migliori LSA è anche prevista una **funzione di post-elaborazione**, attuata da un microprocessore interno che esegue particolari algoritmi sui dati memorizzati.

Tramite opportune **sonde di corredo**, un LSA può svolgere anche altre funzioni:

- analizzatore di forme d'onda, emulando un oscilloscopio digitale;
- misuratore di frequenze e tempo, emulando un contatore universale;
- generatore di parole digitali.

Ad esempio, per svolgere le funzioni di un oscilloscopio digitale, un LSA deve essere munito di una sonda con porta di campionamento e poi di un sistema di trasferimento dei dati all'acquisitore senza passaggio per alcuna soglia.

Un LSA può anche funzionare da analizzatore di firma, dispositivo di cui parleremo nel prossimo paragrafo.

ANALIZZATORI DI FIRMA

Nel paragrafo precedente si è visto che l'analisi dei guasti di un sistema digitale tramite un analizzatore di stati logici comporta varie difficoltà e porta via quindi molto tempo. Per ridurre questo tempo, si è pensato ad una serie di procedure più rapide (anche se in grado di fornire

informazioni minori) per la verifica funzionale dei sistemi digitali. Una delle procedure più diffuse, relativamente ai soli circuiti con funzionamento sincrono, è l'**analisi di firma**.

In primo luogo, si considera il sistema in prova come una serie di nodi interessati da un flusso seriale di bit. Si applica quindi al circuito una sollecitazione bene nota e si controlla, nodo per nodo, il flusso dei bit. In particolare, tali bit vengono inviati, tramite apposita **sonda logica**, all'ingresso dell'**analizzatore di firma**: questo li comprime mediante un particolare algoritmo, il quale dà in uscita una parola binaria (in genere da 16 bit) detta **firma**. L'algoritmo è ovviamente tale che ad ogni sequenza di bit sia associata un'unica firma.

Una volta ricavate le firme nei diversi nodi, le si confronta con quelle di riferimento, ossia quelle che ci si aspetterebbe nel caso di funzionamento corretto: se tutte le firme rilevate coincidono con le rispettive firme di riferimento, si deduce che il sistema funziona correttamente; in caso contrario, è presente qualche anomalia.

Si intuisce come il cuore dello strumento sia proprio il **sistema di compressione dei dati**: l'algoritmo deve essere tale che la variazione di un solo bit nella sequenza seriale dei dati del nodo in esame porti ad una firma diversa e consenta perciò di rilevare il malfunzionamento⁷.

La verifica della firma è ripetuta ciclicamente, in modo da evidenziare anche errori intermittenti che causerebbero una firma instabile nel tempo.

Dal punto di vista realizzativo, possiamo vedere un analizzatore di firma costituito da 3 parti:

- **sistema di acquisizione dei dati**: i dati vengono prelevati dal circuito in prova generalmente mediante una **sonda logica** a forma di stilo, il cui puntale può essere collegato (a contatto) con un nodo qualsiasi del sistema in prova. All'interno della sonda, c'è un **comparatore a soglia**, predisposto ovviamente per i valori caratteristici della famiglia logica. Oltre ai dati provenienti dal circuito, sono prelevati dall'esterno almeno altri tre segnali: due segnali, uno di START ed uno di STOP, per individuare l'intervallo di tempo per l'osservazione; un segnale di CLOCK per consentire la temporizzazione delle operazioni di acquisizione, memorizzazione e visualizzazione (dopo la compressione);
- **sistema di compressione**, di cui abbiamo parlato prima;
- **sistema di visualizzazione**, con ovvie funzioni.

Una particolare cura va riservata sia per la scelta della sollecitazione sul circuito in prova sia per la predisposizione dello stesso circuito: dobbiamo infatti ricordarci che i circuiti di memoria sono influenzati, nella propria risposta ad una sollecitazione in ingresso, dal valore casuale che essi hanno immagazzinato inizialmente. Per questo, sono state studiate opportune sollecitazioni, in modo da rendere agevole e rapido il controllo limitato ai casi di guasto più frequenti.

Infine, ricordiamo che anche l'analizzatore di firma presenta generalmente una linea digitale per l'interfacciamento con un elaboratore, in modo da facilitare e velocizzare la ricerca dei guasti.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**

e-mail: sandry@iol.it

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>

succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>

⁷ E' bene però sottolineare che dall'analisi di firma non è possibile risalire ai bit errati nella sequenza seriale, ma è possibile solo rilevare il malfunzionamento.