

1 Caratteristiche generali dei multimetri

1.1 Introduzione

Il multimetro è uno strumento di misura che consente di effettuare la misurazione di diverse grandezze elettriche. Le grandezze che possono essere misurate da qualunque multimetro sono la tensione, la corrente e la resistenza elettrica. Multimetri più sofisticati sono in grado di effettuare anche misure di capacità elettriche, induttanze, frequenze, temperature ed altro.

I multimetri si dividono in due famiglie:

- **multimetri analogici**, che presentano un indice che si muove lungo una lancetta graduata;
- **multimetri digitali**, che mostrano il valore su un display a sette segmenti o su un display a cristalli liquidi.



Fig. 1.1 Uno dei primi voltmetri portatili a lettura diretta, prodotto dalla Weston Electrical Instruments, 1888.

Breve storia del multimetro

I primi strumenti per misurare le grandezze elettriche sono stati costruiti nell' '800 ed erano strumenti analogici molto scomodi da utilizzare. I primi galvanometri avevano un complicato sistema a specchio e cannocchiale per poter leggere il valore della corrente.

Già alla fine dell'800 comunque son stati prodotti i primi voltmetri e amperometri a lettura diretta, costituita da un ago che scorre lungo una scala graduata (Fig 1.1).

Il primo multimetro digitale è stato costruito da *Andy Kay*, della società *Non-Linear Systems* nel 1954. I primi multimetri digitali erano poco accurati ma già nel 1967 viene messo nel commercio il *Fluke 8100A*, un multimetro digitale di eccellente risoluzione e accuratezza, considerando che è stato progettato più di quarant'anni fa (Fig 1.2). I multimetri analogici restano comunque preferiti a quelli digitali per molto tempo ancora e solamente negli ultimi vent'anni i multimetri digitali stanno completamente soppiantando gli strumenti analogici. Al giorno d'oggi i multimetri

analogici sono utilizzati solamente per scopo didattico o per misure domestiche; nell'ambito industriale il multimetro analogico è di fatto scomparso.



Fig. 1.2 Voltmetro Fluke 8100A, prodotto nel 1967 è uno dei primi voltmetri digitali. All'epoca non esistevano i led pertanto il valore è visualizzato mediante tubi di Nixie. Questo voltmetro ha un'eccellente risoluzione ($4 \frac{1}{2}$ cifre), ed un'ottima accuratezza rispetto ai voltmetri dell'epoca.

Vantaggi del multimetro digitale

I vantaggi di utilizzare un multimetro digitale sono molteplici:

- l'indicazione sul display è in forma numerica e ciò esclude errori di lettura e di parallasse dovuti all'inesperienza dell'operatore.
- è possibile utilizzare il multimetro in posizione obliqua o verticale senza avere errori di lettura a differenza del multimetro analogico che deve essere posizionato seguendo regole precise.
- multimetri più sofisticati possono comunicare con altri strumenti di misura e con un calcolatore per effettuare misure automatiche o memorizzare le misure effettuate.
- solitamente i multimetri digitali presentano un'accuratezza molto più elevata degli strumenti analogici.

L'unico vantaggio dei multimetri analogici è che non necessitano di alimentazione in quanto sfruttano la corrente da misurare per muovere la lancetta sulla scala graduata.

I multimetri si dividono ulteriormente in due diverse tipologie:

- I **multimetri da banco**, che necessitano di un'alimentazione esterna, possono essere collegati ad altri strumenti di misura tramite il bus IEEE-488 ed essere gestiti da un computer.
- I **multimetri portatili**, sono più economici ma anche meno accurati e solitamente sono alimentati a batteria.

1.2 Specifiche del multimetro numerico

Nel mercato esistono diverse tipologie di multimetri; le differenze tra i diversi multimetri si possono ricavare consultando il datasheet del prodotto, nel quale sono indicate le specifiche. Le più importanti sono le seguenti:

- **Numero di cifre:** solitamente viene utilizzato un display con cifre a sette segmenti e il numero di cifre utilizzate per mostrare il valore della misura può essere un numero intero o frazionario. Spesso la cifra più significativa non può assumere tutti i valori (spesso può variare solo da 0 a 1, o da 0 a 2) e in questi casi la cifra più significativa viene contata come mezza cifra.
- **Risoluzione:** Varia a seconda del fondoscala utilizzato e corrisponde all'unità del peso della cifra meno significativa.
- **Sensibilità:** è la risoluzione nel caso si scelga il fondoscala minimo. È un parametro molto importante perché indica la minima variazione della grandezza che lo strumento riesce a misurare.
- **Accuratezza:** è solitamente indicata con un valore percentuale, è utile per calcolare l'incertezza di caso peggiore e quindi conoscere il range nel quale si trova il valore della grandezza misurata. Questo argomento è ampiamente approfondito nel capitolo 5.
- **Categoria:** I multimetri, sia digitali che analogici, sono divisi in quattro categorie in base all'utilizzo per cui sono predisposti. Le categorie sono proposte dallo standard CEN-EN61010 e sono le seguenti:
 - CAT I: uso per correnti, tensioni, potenze molto basse.
 - CAT II: uso per impianti elettrici domestici e aziendali.
 - CAT III: uso con carichi di potenza come pannelli di distribuzione, motori, prese di distribuzione.
 - CAT IV: uso per correnti, tensioni e potenze molto alte come quadri di distribuzione generale, quadri di misura e grandi impianti.

Qui di seguito vi è un confronto tra due multimetri diversi per mostrare le differenze tra le specifiche di un multimetro portatile economico e un multimetro da banco abbastanza sofisticato: il primo (Fig. 1.3a) è un multimetro portatile *Wavetek Meterman 27XT*, il secondo (Fig. 1.3b) è un multimetro da banco *Tektronix DMM 4050*. È stato scelto un multimetro portatile economico ed un multimetro da banco tra i più costosi presenti sul mercato. Chiaramente ci sono diversi multimetri che hanno prezzi e prestazioni intermedi ai due.

Specifiche	Wavetek Meterman 27XT	Tektronix DMM 4050
Numero di cifre	3 1/2	6 1/2
Errore tensioni continue (% del valore misurato)	0,50%	0,0024%
Fondoscala tensioni continue	200mV-1000V	100mV-1000V
Sensibilità tensioni continue	0.1mV	100nV
Alimentazione	9 V	220 V
Interfaccia remota	Nessuna	RS-232C, IEEE-482
Categoria	II	II
Prezzo	€ 50	€ 1.300

Come è possibile notare dallo schema le prestazioni e il prezzo dei due multimetri sono molto diverse tra loro.



Fig. 1.3 a) A sinistra: *Wavetek Meterman 27XT*, multimetro portatile ed economico;
b) A destra: *Tektronix DMM 4050*, multimetro da banco di elevate prestazioni.

Anche se i multimetri possono avere specifiche così diverse tra loro, la circuiteria e i principi di funzionamento dei multimetri digitali sono molto simili e possono essere ricondotti allo stesso schema generale indipendentemente dal tipo di apparecchio preso in considerazione

Schema generale di un multimetro digitale

2.1 Principio di funzionamento

Lo schema in figura 2.1 mostra il principio di funzionamento generale di un multimetro digitale.

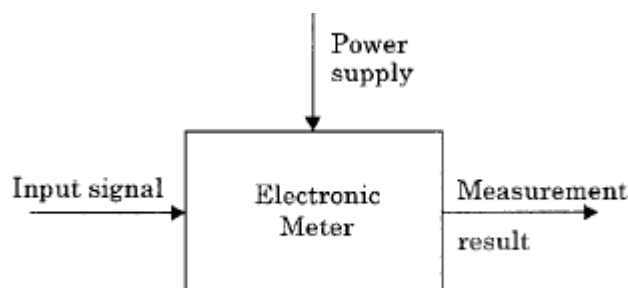


Fig. 2.1 Schema essenziale di un multimetro digitale.

Il segnale analogico da misurare viene convertito in segnale digitale e successivamente in codice numerico che viene visualizzato in un display. Nello schema è messo in evidenza che per compiere questa operazione è necessaria una tensione di alimentazione.

Un multimetro digitale (che da ora chiameremo anche DMM) misura almeno tensioni, correnti e resistenze. Solitamente si ha la possibilità di cambiare il fondoscala a seconda dell'ordine di grandezza di ciò che si vuole misurare.

Solitamente in ingresso è presente uno switch che va posizionato a seconda del tipo di grandezza da misurare.

Il segnale segue due percorsi differenti a seconda che si voglia effettuare una misura di grandezze continue o alternate e in entrambi i casi viene convertito mediante un convertitore analogico-digitale (ADC). Il convertitore necessita di una tensione di riferimento che deve essere particolarmente costante per evitare errori nella conversione. Pertanto i voltmetri ad alte prestazioni devono essere tarati periodicamente per mantenere le specifiche dichiarate nel datasheet. Questa taratura viene effettuata utilizzando una tensione di riferimento costante, che è ottenuta, ad esempio, utilizzando la pila Weston.

Il segnale, dopo essere stato convertito, viene elaborato per essere visualizzato sul display. Nei DMM più sofisticati il segnale convertito in un valore numerico può

anche essere inviato ad un calcolatore. Infine vi è un generatore di corrente utilizzato nel caso si vogliano misurare resistenze.

2.2 Tipologie del convertitore analogico-digitale

Scendiamo nel dettaglio su come è costituito un DMM. Per prima cosa esistono due modi di affrontare il problema di acquisire e convertire il segnale elettrico: i **convertitori a valor medio** che misurano il valore medio della tensione durante un intervallo di tempo dedicato alla conversione; i **convertitori a valore istantaneo** invece convertono il valore della tensione in un certo istante di tempo.

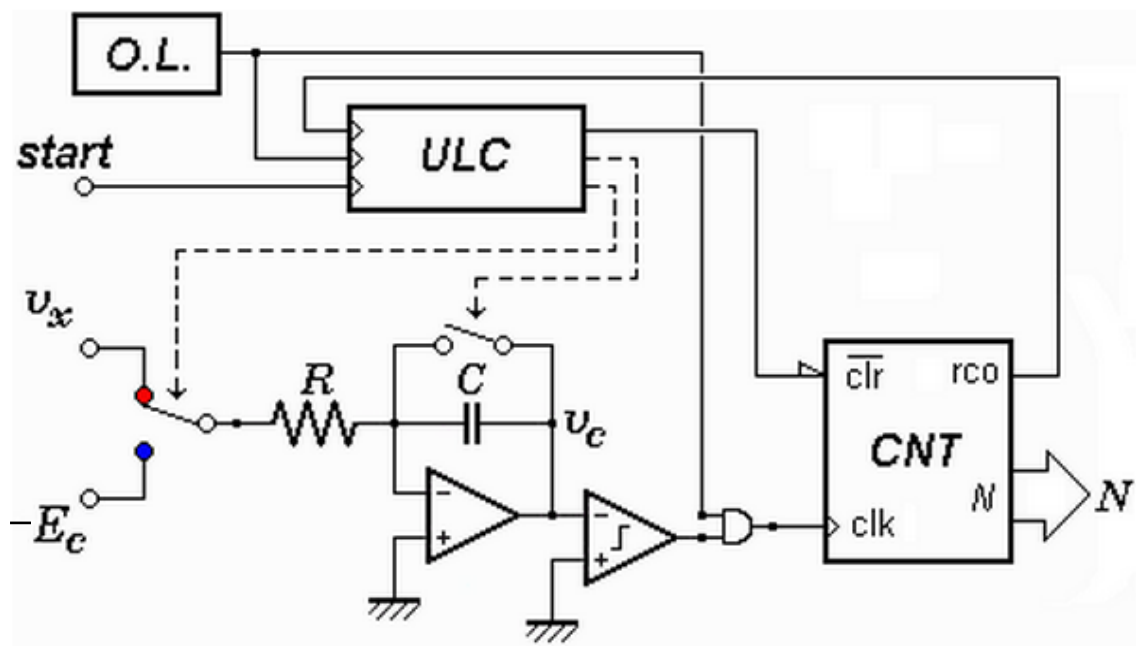
Differenze tra convertitore a valor medio e a valore istantaneo

Il convertitore a valore istantaneo è maggiormente utilizzato in strumenti nei quali si vuole visualizzare l'andamento di una tensione al variare del tempo, come nel caso dell'oscilloscopio digitale; nel caso di una singola misurazione è sconveniente campionare perché se un rumore si sovrappone al segnale, esso viene compreso nella misura, alterandola in maniera imprevedibile. Se si vuole misurare una grandezza che si suppone costante è quindi più conveniente effettuare la media per avere la reiezione di eventuali disturbi.

Dato che i DMM vengono utilizzati prevalentemente per misurare grandezze costanti si utilizzano solitamente convertitori a valor medio.

3.3 Voltmetro a doppia integrazione

Il voltmetro a doppia integrazione realizza la conversione **tensione-tempo**. In figura 3.8 vi è uno schema di questo convertitore.



Descrizione dello schema

Il voltmetro è così costituito: vi è un oscillatore locale (è sufficiente che sia stabile a breve termine); un'unità logica di controllo (ULC) che si occupa di aprire e chiudere gli interruttori e di abilitare o disabilitare i conteggi del clock, un commutatore, un comparatore ed un integratore.

Per prima cosa l' ULC si occupa di chiudere l'interruttore a ponte sull'integratore per scaricare il condensatore, resettare i contatori e selezionare come ingresso dell'integratore la tensione da misurare (V_x). Successivamente si apre l'interruttore sul condensatore iniziando l'integrazione della tensione da misurare. Questa fase viene chiamata *fase di runup*. In questa fase l'uscita del comparatore è positiva e pertanto il contatore conta i cicli dell'oscillatore logico fino all'*overflow*. All'istante dell'*overflow* si attiva il segnale di *carry* (questo istante lo chiamiamo t_1) e la logica di controllo, in risposta al segnale di carry alto, commuta l'ingresso dell'integratore ad una tensione $-E_c$, costante e di polarità opposta alla tensione da misurare. Il contatore, azzerato dopo l'*overflow*, conta i cicli di clock (fase di *rundown*) fino a

quando l'uscita dell'integratore diventa nulla (istante t_2). A questo punto il comparatore commuta disabilitando il conteggio del clock e la conversione termina. Dunque il numero di cicli di clock contati è proporzionale alla tensione incognita.

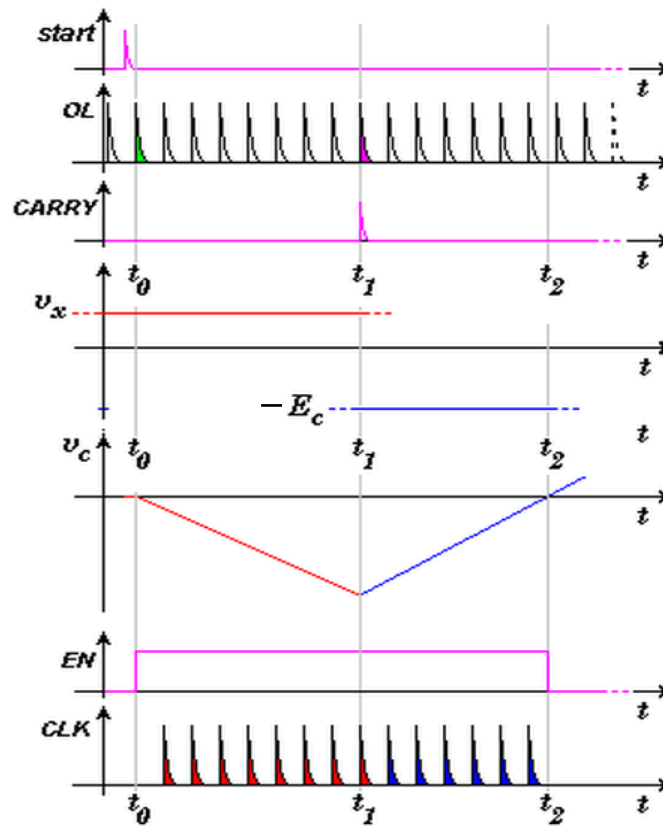


Fig. 3.9 Nei grafici è indicato l'andamento di diversi segnali che consentono il corretto funzionamento del voltmetro a doppia integrazione. Dall'alto il segnale (start) che abilita la conversione, l'oscillatore locale, il segnale di overflow, l'ingresso dell'integratore, l'uscita dell'integratore (in rosso la fase di runup, in blu la fase di rundown), il segnale enable, il clock del counter.

Considerando che sia all'istante t_0 che all'istante t_2 il condensatore è scarico, il condensatore si carica fino all'istante t_1 e poi si scarica della stessa quantità di carica fino all'istante t_2 .

Per comodità chiamiamo T_U l'intervallo $[t_0, t_1]$ e T_D l'intervallo $[t_1, t_2]$

Quindi uguagliando si ha:

$$\frac{1}{RC} \int_{T_U} V_x dt = \frac{1}{RC} \int_{T_D} E_c dt \quad (3.14)$$

Supponendo che la V_x sia costante si ottiene:

$$V_x = E_c \frac{T_D}{T_U} \quad (3.15)$$

Se la tensione incognita varia durante l'intervallo T_U si ottiene la media della tensione V_X in tale intervallo. Infatti dalla 3.14 si ha:

$$\int_{T_U} V_X dt = E_C T_D \quad (3.16)$$

Dividendo per T_U si ottiene ciò che abbiamo enunciato:

$$\frac{1}{T_U} \int_{T_U} V_X dt = E_C \frac{T_D}{T_U} \quad (3.17)$$

Dato che l'oscillatore è unico il periodo del clock può essere semplificato e si ottiene:

$$V_X = E_C \frac{N_D t_{CK}}{N_U t_{CK}} = E_C \frac{N_D}{N_U} \quad (3.18)$$

L'equazione 3.17 mostra che la tensione incognita è proporzionale all'intervallo T_D . Il valore N_D viene poi opportunamente codificato per essere visualizzato nel display del multimetro.

Incertezza

Nella misura della tensione sono presenti solamente la tensione di riferimento e il numeri dei cicli di clock del primo e del secondo intervallo. La misura della tensione V_X risulta essere indipendente rispetto alla frequenza dell'oscillatore, al valore della resistenza e del condensatore dell'integratore.

Inoltre, considerando che N_D ha incertezza nulla (corrisponde sempre al valore massimo che può assumere il contatore), l'accuratezza della misura dipende solamente dalla stabilità (a lungo termine) della tensione di riferimento e dall'incertezza della misura dei cicli di clock (poiché l'intervallo di rundown in genere non durerà un numero intero di cicli di clock). L'incertezza relativa si esprime così:

$$\frac{\delta V_X}{V_X} = \frac{\delta E_C}{E_C} + \frac{1}{N_D} \quad (3.19)$$

Aumentando N_D l'incertezza relativa si riduce.

Tuttavia nel circuito sono presenti diverse altre fonti di incertezza che peggiorano l'accuratezza della conversione. Vi sono tensioni di offset ed effetti di non linearità dell'integratore, offset del comparatore di soglia e cariche residue nel condensatore.

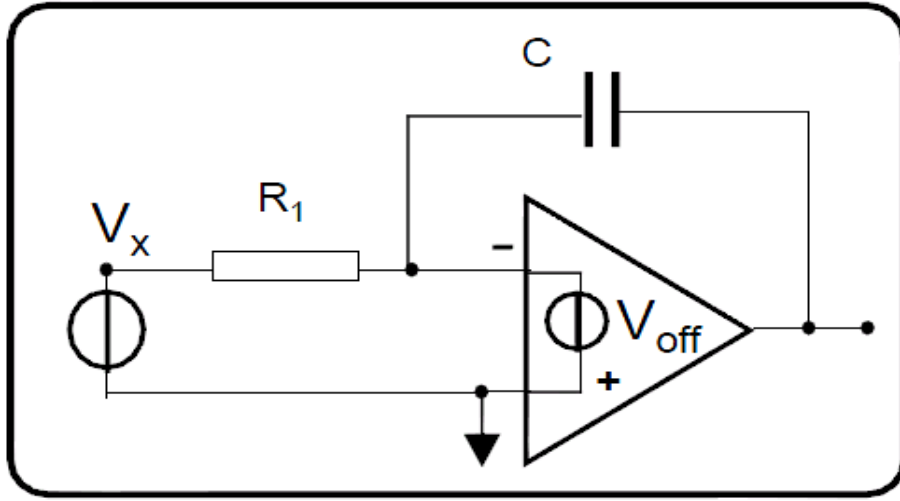


Fig . 3.10 Integratore di Miller con offset di tensione.

Consideriamo ad esempio come varia l'uscita se l'integratore presenta un offset:
 Nel primo intervallo viene integrato $V_X + V_{off}$ mentre nel secondo tratto si integra $-E_C + V_{off}$. Sostituendo nell' equazione 3.15 si ottiene:

$$(V_X + V_{off}) = (E_C - V_{off}) \frac{T_D}{T_U} \quad (3.20)$$

e raccogliendo secondo le tensioni:

$$V_X = E_C \frac{T_D}{T_U} - V_{off} \left(1 + \frac{T_D}{T_U}\right) \quad (3.21)$$

L'eventuale offset dell'integratore causa un'incertezza assoluta di:

$$|\Delta V_X| = |V_{off}| \left(1 + \frac{T_D}{T_U}\right) \quad (3.22)$$

L'offset del comparatore genera un errore in quanto il comparatore non commuta nell'istante esatto in cui la tensione in ingresso è nulla.

Questo provoca un errore sul valore della T_D e pertanto si ha:

$$V_X = E_C \frac{T_D + T_{ERR}}{T_U} \quad (3.23)$$

dove T_{ERR} vale:

$$T_{ERR} = \frac{V_{off} RC}{E_C} \quad (3.24)$$

quindi l'incertezza assoluta vale:

$$|\Delta V_X| = |V_{off}| \frac{RC}{T_U} \quad (3.25)$$

Si nota che per ridurre l'incertezza dovuta sia all'offset del comparatore che dell'integratore è necessario aumentare la durata dell'integrazione della tensione incognita (T_U).

L'errore dovuto a cariche residue del condensatore ha conseguenze del tutto analoghe all'offset del comparatore.

Risoluzione

Per calcolare la risoluzione del voltmetro, ovvero la minima variazione apprezzabile, va considerato l'errore di quantizzazione, causato dal fatto che quando il comparatore commuta, il contatore avrà contato un certo numero di periodi di clock più una frazione che viene ignorata. In particolare tale errore di quantizzazione è presente nella fase di *rundown* mentre è assente nella fase di *runup* perché T_U è un intervallo multiplo del periodo del clock. La risoluzione del convertitore è fissata dal passo di quantizzazione che risulta essere:

$$\Delta V = \frac{E_C}{N_U} ; \quad (3.26)$$

Dato che N_U deve essere massimizzato per migliorare la risoluzione conviene porlo uguale al massimo numero visualizzabile dal multimetro. Allora risulta che la tensione massima convertibile è E_C , N_D deve essere minore o uguale di N_U e la risoluzione è:

$$\Delta V = \frac{E_C}{N_U} = \frac{F.S.}{N_{D_{MAX}}} \quad (3.27)$$

Se il contatore del convertitore è di n bit la risoluzione è $\frac{F.S.}{2^n}$.

Tempo di conversione

La durata della misurazione è la somma dei due periodi di *runup* e *rundown*. Utilizzando la formula precedente e nominando t_c il periodo di clock si può scrivere:

$$T_{MIS} = T_U + T_D = (N_U + N_D) t_C = \frac{|E_C| + |V_X|}{F.S.} N_{D_{MAX}} t_C \quad (3.28)$$

Il tempo di misurazione massimo si ha quando $V_X = F.S.$. In tal caso si ha:

$$T_{MIS_{MAX}} = \left(\frac{|E_C|}{F.S.} + 1 \right) N_{D_{MAX}} T_C \quad (3.29)$$

Se si fissa il fondoscala e la $N_{D_{MAX}}$ per ridurre il tempo di misurazione si dovrebbe ridurre la E_C . Tale scelta provoca una riduzione della T_D ma riduce anche la pendenza della rampa di *rundown* e ciò provoca un aumento dell'incertezza nella determinazione dell'attraversamento dello zero di V_C . Per questo conviene scegliere E_C pari al valore del fondoscala e si ottiene che il tempo di misura massimo è:

$$T_{MIS_{MAX}} = 2 N_{D_{MAX}} t_C \quad (3.30)$$

$$\text{e quindi } N_U = N_{D_{MAX}} . \quad (3.31)$$

Si deduce che, migliorando la risoluzione il tempo di misurazione aumenta. Infatti sostituendo si ha:

$$T_{MIS_{MAX}} = 2 \frac{F.S.}{\Delta V} t_C . \quad (3.32)$$

Considerando di progettare un convertitore che rappresenti la tensione utilizzando n bit il tempo di misurazione è:

$$T_{MIS_{MAX}} = 2^{n+1} t_C . \quad (3.33)$$

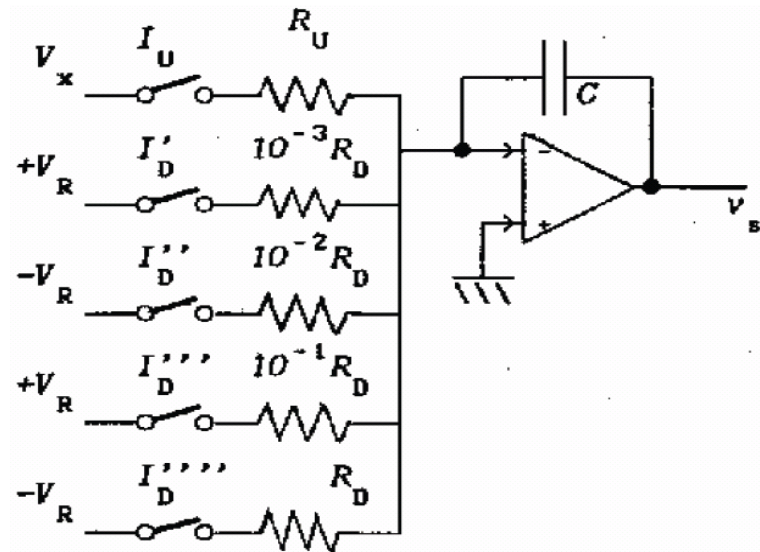
Se si vuole aumentare la risoluzione di un bit, il tempo di misurazione raddoppia. La seguente tabella indica i tempi di conversione al variare del numero di cifre considerando strumentazione *normale* e *pregiata*. Si vede che, aumentando il numero di cifre, il tempo di conversione aumenta in maniera esponenziale.

	STRUMENTAZIONE	
	Normale	Pregiata
RISOLUZIONE CIFRE	VELOCITA' CONVERSIONE (convers/sec)	VELOCITA' CONVERSIONE (convers/sec)
3 1/2	85	-
4 1/2	30	10 ⁵
5 1/2	3,7	-
8 1/2	-	6

Il voltmetro a doppia rampa è un convertitore a valor medio quindi offre un'ottima reiezione dei disturbi. Tuttavia ha un difetto non trascurabile: è un convertitore molto lento se la risoluzione è molto elevata. Per ridurre tale difetto si effettuano delle modifiche allo schema originale che riducono il tempo di conversione.

3.4 Voltmetro a rampe multiple

Una forte riduzione del tempo di scarica (*rundown*) è ottenuta mediante l'utilizzo di più rampe di diversa pendenza. I voltmetri così progettati prendono il nome di *voltmetri a rampe multiple*. Lo schema generale resta immutato rispetto al classico voltmetro a doppia rampa ma varia l'integratore di Miller. In ingresso all'integratore vi sono tensioni di polarità negativa e positiva in alternanza e impedenze ognuna dieci volte maggiore della successiva (fig 3.13).



Nella fase di *runup* l'integratore si comporta alla stessa maniera di un integratore a doppia rampa. Dopo il tempo T_U si apre l'interruttore I_U , si chiude I_D^i e si inizia il conteggio fino a quando la rampa attraversa lo zero. A questo punto si apre I_D^i e si chiude I_D^{ii} . Questa commutazione dei due interruttori avviene al colpo di clock successivo all'attraversamento dello zero. Dato che la tensione di riferimento ha verso opposto si inverte la rampa e si attiva un nuovo conteggio fino al nuovo attraversamento dello zero. Si prosegue così fino all'ultimo interruttore. Naturalmente poiché le resistenze sono ognuna dieci volte più grandi della precedente la pendenza della rampa si ridurrà di dieci volte ad ogni ciclo. L'andamento della tensione di uscita sarà quello mostrato in figura 3.14.

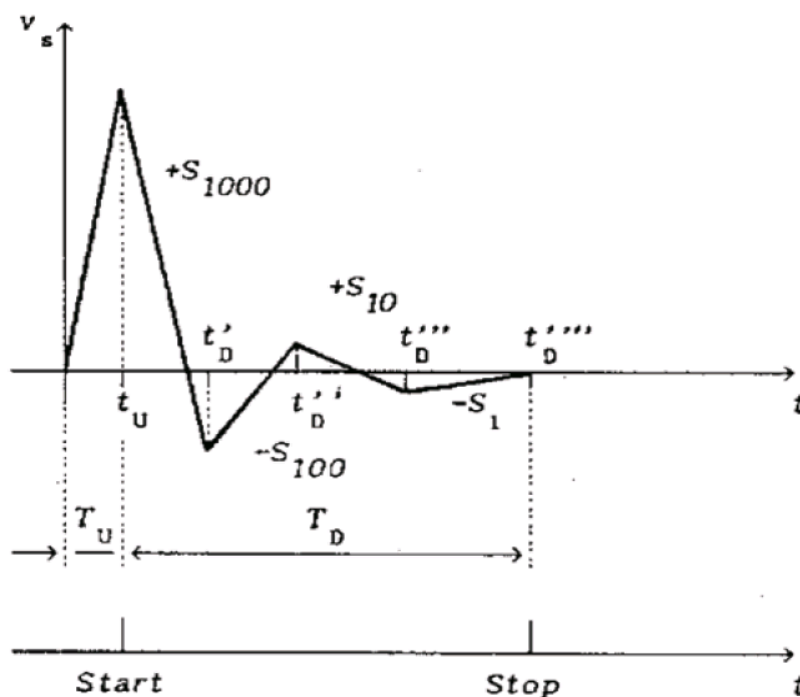


Fig 3.14 Grafico della tensione d'uscita dell'integratore

Consideriamo un esempio di tensione da convertire per chiarire il procedimento: Supponiamo che una tensione misurata mediante un convertitore a doppia rampa dia come risultato 237 impulsi di clock. Consideriamo un convertitore a rampe multiple con tre rampe di integrazione. L'intervallo T_U è identico in entrambi i casi. Successivamente viene integrato utilizzando una rampa 100 volte più ripida di quella del voltmetro a doppia integrazione. Quindi vengono contati solo due cicli di clock in quanto durante il terzo ciclo di clock la tensione in uscita dell'integratore diventa negativa. Al termine del terzo ciclo di clock la tensione è stata integrata oltre lo 0 per 0.63 cicli di clock; si inverte la monotonia della rampa e si riduce la pendenza di dieci volte e si contano i cicli di clock fino al successivo attraversamento dello zero. Durante il settimo ciclo di clock il valore diventa positivo e quindi i cicli di clock contati sono 6 e al termine del settimo ciclo di clock la tensione è stata integrata oltre lo 0 per 0.7 cicli di clock. Quindi si considera una rampa di pendenza opposta e ripidità dieci volte minore della precedente, tale rampa è della stessa pendenza di quella dell'integratore a doppia rampa. Si contano 7 cicli di clock fino a quando la tensione diventa nulla. I valori contati sono 2, 6, 7. Il valore della tensione si ottiene mediante una modifica di tali valori eseguita da un'opportuna logica di controllo seguendo questa regola:

- La prima cifra resta immutata.
- Le cifre di posto pari sono complementate a 9.
- Le cifre di posto dispari restano immutate.
- L'ultima cifra, se è di posto pari, va complementata a 10, altrimenti resta immutata.

Seguendo tale regola i valori ottenuti sono 2,3,7; questi valori sono moltiplicati per il fattore moltiplicativo della pendenza e vengono sommati tra loro.

Si ottiene quindi:

$$2 \cdot 100 + 3 \cdot 10 + 7 \cdot 1 = 237 ;$$

Tale valore coincide con il valore ottenuto mediante il voltmetro a doppia rampa.

Il tempo di conversione in questo caso è $T_U + 14$ cicli di clock, mentre con il convertitore a doppia rampa avremmo ottenuto $T_U + 237$ impulsi di clock. Questo procedimento consente di ottenere convertitori molto veloci senza peggiorare la risoluzione rispetto al caso del voltmetro a doppia rampa. Infatti se il risultato, considerando anche le frazioni di clock, fosse 237.4, con entrambi i procedimenti esso sarebbe approssimato a 237.

Il **tempo massimo di conversione** si ottiene considerando il caso peggiore, ovvero il caso in cui si contano dieci cicli di clock per ogni cifra:

$$T_{MIS_{MAX}} = 10C t_C + T_U \quad (3.37)$$

dove C è il numero di cifre e t_C il periodo del clock.

Un esempio dettagliato

La seguente tabella mostra passo dopo passo come avviene la conversione della tensione per un valore scelto casualmente.

Esempio: con un convertitore a doppia rampa V_X corrisponde a 1243 cicli di clock. Si converte la stessa tensione utilizzando un voltmetro a quattro rampe.

Elerk di clock	Pendenza (rapporto rispetto doppia rampa)	Elerk'f k'emem f qr q"cwtxgt/ uco gpw'2	Cicli di clock contati	Valore rettificato	Valore moltiplicato per la pendenza
1.243	-1000	-20757	1	1	1000
-7.57	100	0.43	7	2(CP9)	200
4.3	-10	-0.7	4	4	40
-7	1	0	7	3 (CP10)	3

Sommando i valori dell'ultima colonna si ottiene il valore 1243

4 Tipologie di circuiti per la misura delle grandezze elettriche

4.1 Introduzione

Il cuore di un multimetro digitale è costituito dall'ADC, ovvero dal dispositivo che legge la grandezza analogica e la converte in grandezza digitale. In particolare nei multimetri digitali l'ADC è un voltmetro numerico con un unico fondoscala, in grado di convertire solamente tensioni continue. Per misurare le altre grandezze si antepongono dei sottoblocchi che modificano il segnale in ingresso per portare all'ingresso dell'ADC una tensione continua e compatibile con il fondoscala del convertitore. In questo capitolo approfondiamo come sia possibile ottenere un voltmetro, un amperometro e un ohmmetro multiportata a partire da un voltmetro di base a singola portata descritto nel capitolo precedente. In particolare negli schemi che verranno descritti si utilizzerà un voltmetro a doppia rampa.

4.2 Voltmetro multiportata

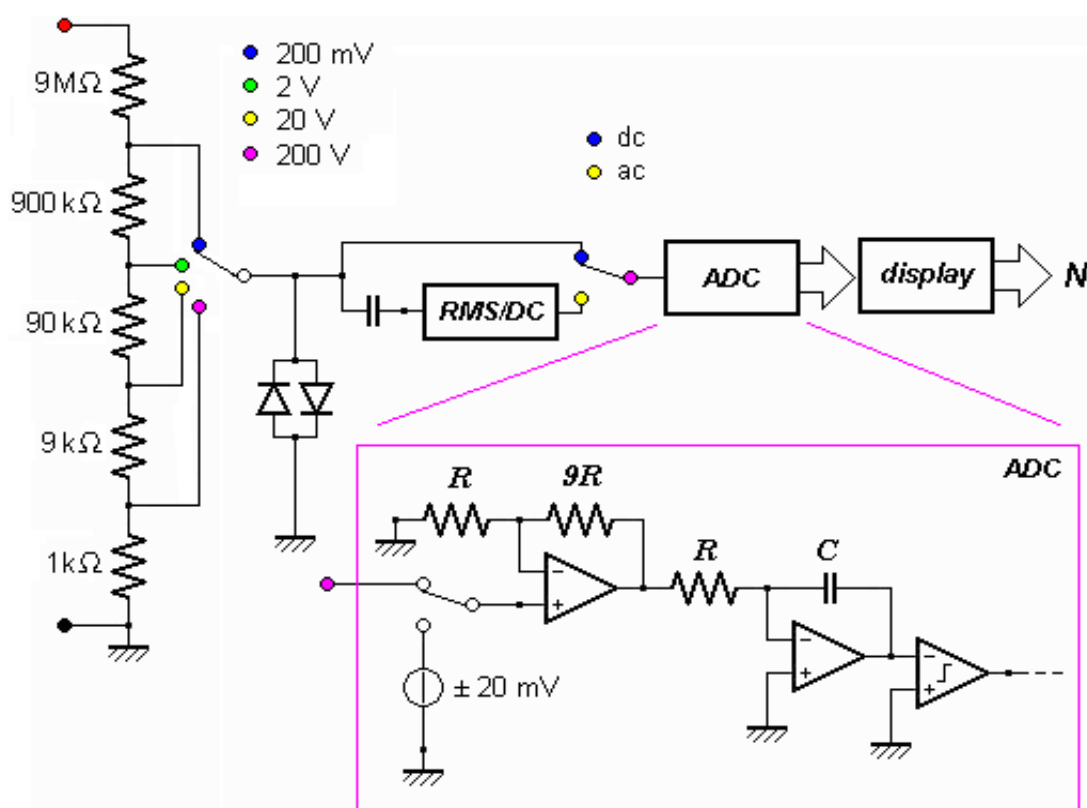


Fig 4.1 Schema a blocchi di un voltmetro multiportata

Partitore d'ingresso

La figura 4.1 mostra lo schema generale di un voltmetro multiportata. Il segnale da misurare viene prelevato agli estremi del partitore. L'impedenza d'ingresso (R_V) è di $10\text{M}\Omega$, un valore molto elevato per poter leggere correttamente la tensione incognita (V_X) che presenterà una resistenza equivalente di Thevenin R_X ; solitamente in ingresso è presente anche una capacità parassita di 10-50 pF. La tensione misurata si calcola considerando il circuito equivalente di figura 4.2.

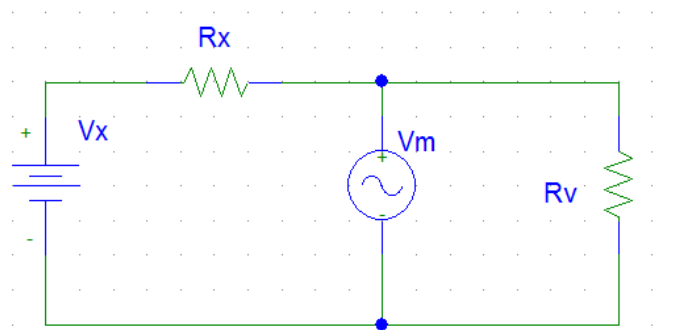


Fig 4.2 Circuito equivalente della misura di tensione mediante il voltmetro

$$V_M = V_X \frac{R_V}{R_V + R_X} \quad , \quad (4.1)$$

se $R_V \gg R_X$ allora

$$V_M \approx V_X \quad . \quad (4.2)$$

Subito dopo il partitore vi è un selettore che determina dove viene prelevata la tensione. Il convertitore considerato ha il fondoscala di 200mV e in figura è mostrato che l'ingresso del convertitore è un amplificatore di guadagno 10. Pertanto dopo il partitore la tensione non deve superare i 20mV. Per misurare tensioni più elevate si deve prelevare solamente una frazione di tensione. Se si preleva la tensione sul morsetto blu si preleva 1/10 di tensione e si avrà un fondoscala di 200mV; sul morsetto verde si preleva 1/100 della tensione incognita e si alza il fondoscala a 2V e così via fino al fondoscala più elevato (morsetto viola) dove si preleva 1/10000 di tensione e si ha un fondoscala di 200V.

Il partitore deve essere costituito utilizzando resistenze di elevata precisione al fine di ottenere un rapporto preciso. Inoltre le resistenze devono avere lo stesso coefficiente di temperatura della resistività al fine di mantenere costante la frazione di tensione prelevata anche in presenza di variazioni di temperatura.

Per ottenere voltmetri di maggiore precisione si deve realizzare un voltmetro a singola portata. Se si applica il segnale direttamente al convertitore l'impedenza d'ingresso sarà particolarmente elevata (diversi $\text{G}\Omega$), riducendo gli errori causati dal fatto che la resistenza d'ingresso non è infinita.

Diodi di protezione

Successivamente vi sono due diodi antiparalleli tra loro. Questi diodi costituiscono un circuito di protezione e servono per evitare che tensioni troppo elevate danneggino il convertitore. Questi diodi, se le tensioni sono minori di 20mV, sono uno sotto soglia e l'altro inversamente polarizzato. Se il modulo della tensione supera la tensione di soglia del diodo (0.2 V per diodi al germanio, 0.6 V per i diodi al silicio) uno dei due diodi entra in conduzione e la variazione di impedenza d'ingresso causata dalla conduzione del diodo porterà ad un abbassamento della tensione.

Dopo questa protezione vi è un selettore che va selezionato opportunamente dall'utente a seconda se si vuole misurare una tensione continua o alternata.

Convertitore

Proseguendo vi è un amplificatore di guadagno 10 che presenta in ingresso un' impedenza molto alta e in uscita una bassa impedenza. Questo consente di non alterare il valore della tensione da misurare a causa degli effetti di carico. Quindi vi è il convertitore analogico-digitale che consente di ottenere il risultato della misurazione in forma numerica. In questo caso è utilizzato un voltmetro a doppia rampa, il cui funzionamento è spiegato nel capitolo 3.

Infine il risultato viene opportunamente codificato per essere visualizzato sul display.

4.4 Amperometro multiportata

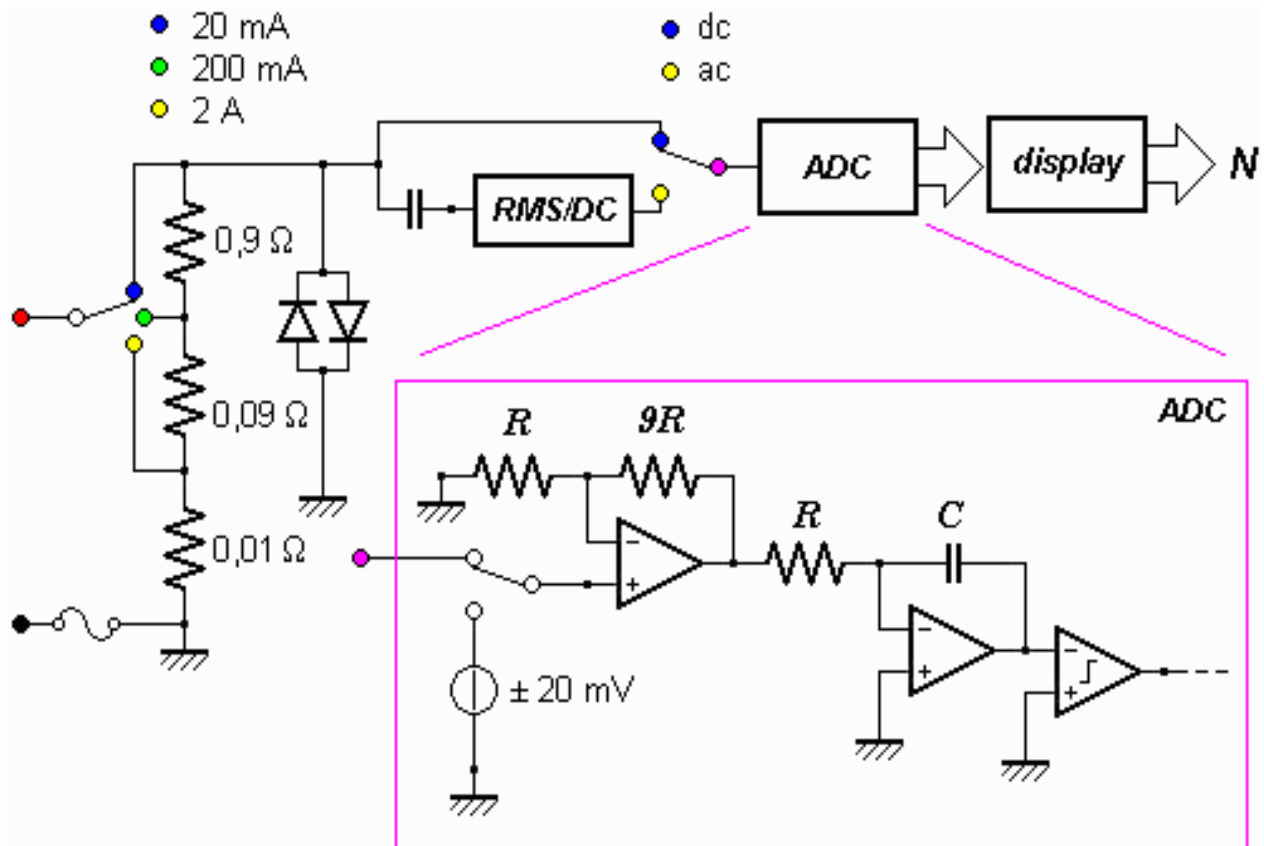


Fig. 4.7 Schema a blocchi dell'amperometro multiportata.

Descrizione dello schema a blocchi

Un amperometro multiportata è del tutto simile ad un voltmetro multiportata ad eccezione del partitore in ingresso e dei valori delle resistenze. Per misurare la corrente, la si fa scorrere in resistenze dal valore fisso e si misura la tensione ai capi delle resistenze. Anche in questo caso la tensione massima deve essere di 20 mV, quindi si devono utilizzare dei partitori per convertire tensioni elevate (ovvero correnti più elevate). A differenza del voltmetro i morsetti dell'amperometro non si connettono sempre agli estremi del partitore ma solo sui resistori selezionati. In questo modo la corrente scorre solo su alcuni resistori e si evita una dissipazione di potenza troppo elevata. Inoltre vi è un fusibile in serie al partitore che interrompe la corrente nel caso sia troppo elevata evitando la rottura dello strumento. Dopo il partitore lo schema è del tutto equivalente a quello del voltmetro e la corrente viene convertita convertendo la tensione ricavata mediante tale procedimento.

Fondoscala dell'amperometro

Per calcolare il fondoscala a partire dai resistori considerati basta considerare che la

tensione massima deve essere 20mV. Quindi si utilizza la formula:

$$I_{F.S.} = V_{F.S.} / R \quad (4.4)$$

Resistenze d'ingresso

Nella seguente tabella sono considerati i diversi fondoscala a seconda delle resistenze selezionate. È anche messa in evidenza la potenza dissipata per ogni fondoscala scelto.

RESISTORE	FONDOSCALA	POTENZA DISSIPATA
1 Ω	20 mA	0.4 mW
0,1 Ω	200 mA	4 mW
0,01 Ω	2 A	40 mW

Se la corrente si facesse scorrere sull'intero partitore, utilizzando lo schema del voltmetro la potenza dissipata sarebbe molto più elevata, come è mostrato dalla seguente tabella :

RESISTORE	FONDOSCALA	POTENZA DISSIPATA
1 Ω	20 mA	0.4 mW
1 Ω	200 mA	40 mW
1 Ω	2 A	4 W

La potenza dissipata in questo caso è molto più elevata e in particolare le resistenze di valore ohmico più elevato dissipano la maggior parte di potenza surriscaldandosi e rischiando di danneggiarsi.

Consideriamo a titolo di esempio la potenza dissipata su ogni singola resistenza nel caso che il fondoscala scelto sia di 2 A nei due casi sopra esaminati.

Se la corrente scorre solo sulle resistenze selezionate la potenza dissipata è la seguente:

RESISTORI	POTENZA DISSIPATA
0.9 Ω	0 W
0.09 Ω	0 W
0.01 Ω	40 mW

Se invece la corrente scorre su tutti i resistori la potenza dissipata è così distribuita:

RESISTORI	POTENZA DISSIPATA
0.9 Ω	508 W
0.09 Ω	360 mW
0.01 Ω	40 mW

Un'altra differenza con il partitore presente nel voltmetro è il valore estremamente basso delle resistenze che costituiscono il partitore. Questo è dovuto al fatto che per misurare correttamente la corrente l'amperometro ideale dovrebbe avere impedenza nulla. Il circuito equivalente della corrente da misurare e dell'amperometro è il seguente:

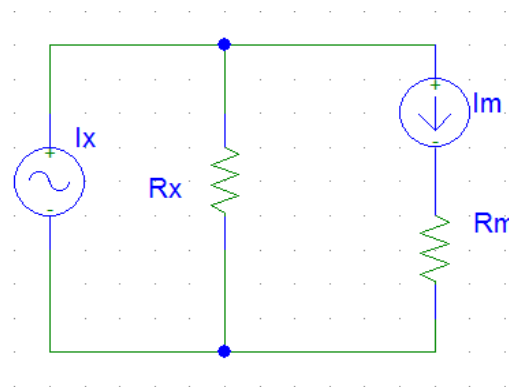


Fig. 4.7 Circuito equivalente della misura di una corrente mediante amperometro

I_X è la corrente da misurare,
 R_X la resistenza equivalente di Norton,
 I_M è l'amperometro,
 R_M è l'impedenza dell'amperometro.

La corrente misurata è :

$$I_M = I_X \frac{R_X}{R_X + R_M} \quad (4.5)$$

Per leggere correttamente la corrente deve essere $R_M \ll R_X$, per tale motivo l'impedenza in ingresso dell'amperometro deve essere molto piccola.

A differenza della resistenza d'ingresso del voltmetro, che è nota con ottima

precisione e non varia modificando la portata, l'impedenza d'ingresso dell'amperometro varia a seconda del fondoscala scelto e non è nota a priori. Per questo nei datasheet solitamente non viene indicato il valore delle resistenze d'ingresso bensì il loro valore massimo. Questo a causa del fatto che in serie ai resistori vi è un fusibile, la cui resistenza non è nota con precisione.

Consideriamo come esempio il multimetro *Fluke 8060A*; il manuale indica le resistenze interne relative all'amperometro nel seguente modo:

PORTATA	RESISTENZA INTERNA
0.2 mA	$\leq 1500 \Omega$
20 mA	$\leq 150 \Omega$
200 mA	$\leq 15 \Omega$
2 A	$\leq 0.45 \Omega$

Per ogni portata è indicato un valore indicativo di resistenza d'ingresso che si presume non venga superato indipendentemente dal fusibile scelto.

4.6 Ohmmetro multiportata

Per misurare un'impedenza incognita si utilizza un procedimento analogo al caso della misura di corrente. In un amperometro la corrente incognita scorre in resistori di valore noto e successivamente si converte la tensione ai capi dei resistori; al contrario per misurare un'impedenza si considera una corrente nota che scorre nell'impedenza incognita, e si misura la tensione ai capi della resistenza. Da qui in poi la situazione è del tutto analoga ai casi precedenti, con l'amplificatore, il convertitore ed infine il display.

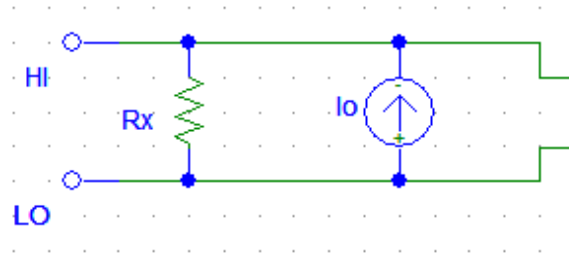


Fig. 4.13 Schema dell'ohmmetro multiportata, dopo il generatore di corrente lo schema è uguale al voltmetro e all'amperometro.

La I_0 è la corrente costante mentre la R_x è la resistenza incognita. Per ottenere diversi fondoscala è necessario modificare il valore della I_0 . Considerando che la massima tensione deve essere 20mV (che diventano 200mV in ingresso al convertitore dopo l'amplificazione) è facile calcolare la I_0 da applicare a seconda del fondoscala scelto.

Basta considerare che $R_x I_0 = 20 \text{ mV}$. (4.7)

Ecco esposti in una tabella i valori di corrente da applicare per ogni fondoscala scelto.

Fondoscala resistenze	Corrente applicata
200 Ω	0.1 mA
2 k Ω	1 μ A
20 k Ω	0.1 μ A
200 k Ω	0.01 μ A
2 M Ω	1 nA

Esistono multimetri che hanno la capacità di *autorange*, ovvero sono in grado di scegliere automaticamente la corrente opportuna per eseguire la misura della resistenza nel modo più efficiente.

Ohmmetro a quattro fili

Se la resistenza da misurare è molto piccola la precisione della misura si riduce in quanto le resistenze di contatto tra la resistenza incognita e lo strumento diventano di ordine di grandezza paragonabile alla resistenza da misurare. Questo porta ad un errore nella misura in quanto la resistenza misurata è la somma della resistenza incognita con le resistenze di contatto.



Fig. 4.15 Ohmmetro a quattro fili 92-5k della Elabo.

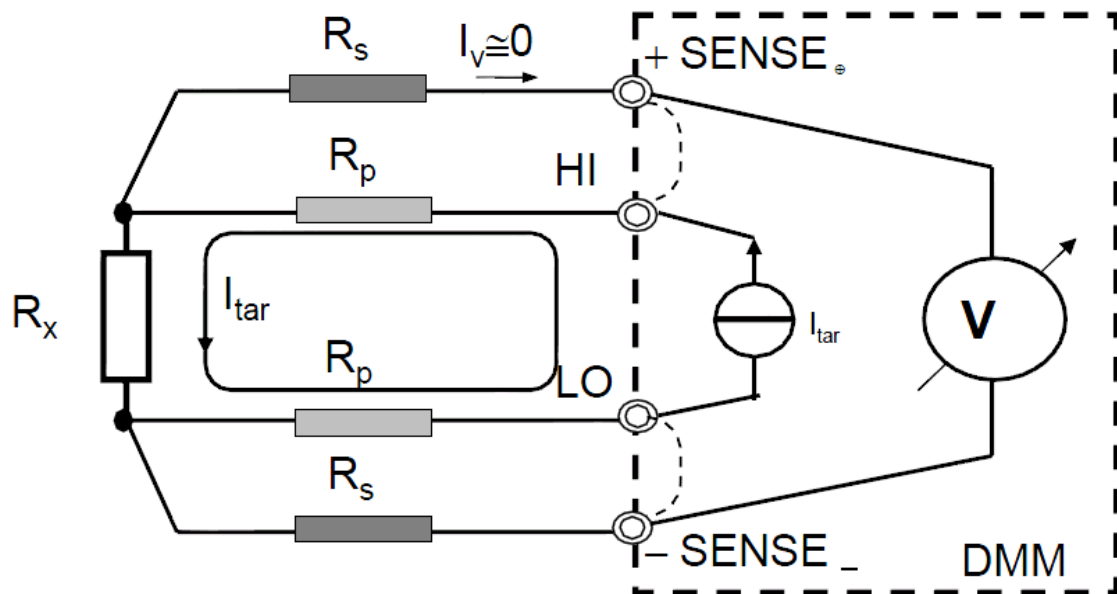


Fig. 4.16 Schema circuitale dell'ohmmetro a quattro fili.

Per ridurre tale problema i multimetri da banco spesso consentono di misurare le resistenze mediante quattro fili.

In questo modo la resistenza incognita è misurata in maniera più precisa in quanto le resistenze di contatto (R_p) tra il generatore di corrente e il resistore non sono considerate dal voltmetro che è connesso a R_x prima di tali resistenze. È vero che il voltmetro a sua volta è collegato al resistore e ciò comporta la presenza di resistenze di contatto ma comunque esse sono trascurabili in quanto nella maglia non circola corrente a causa dell'elevatissima impedenza del voltmetro.

5 Accuratezza del multimetro digitale

Il multimetro digitale visualizza sul display un valore che indica la misura della grandezza da misurare. Tale valore sarà inevitabilmente diverso dal valore reale della grandezza elettrica. Questo perché durante tutto il processo di misurazione saranno utilizzate grandezze che hanno una propria incertezza (come ad esempio la tensione di riferimento) ed i circuiti analogici anteposti al convertitore porteranno un contributo di incertezza.

5.1 Errore di quantizzazione

Il primo errore che si compie in ogni convertitore analogico-digitale è l'errore di quantizzazione. Infatti, utilizzando un numero finito di bit, si fraziona la tensione di riferimento in tanti livelli di tensione creando una caratteristica ingresso uscita a gradino in cui, ad ogni intervallo di tensioni analogiche corrisponde un unico valore di tensione. Nell'esempio in figura 5.1 c'è la caratteristica input-output di un convertitore a 3 bit. Si può osservare che se l'ingresso è minore di $1/8 V_{FS}$, l'uscita è 000; tra $1/8 V_{FS}$ e $2/8 V_{FS}$, l'uscita digitale vale 001 e così via.

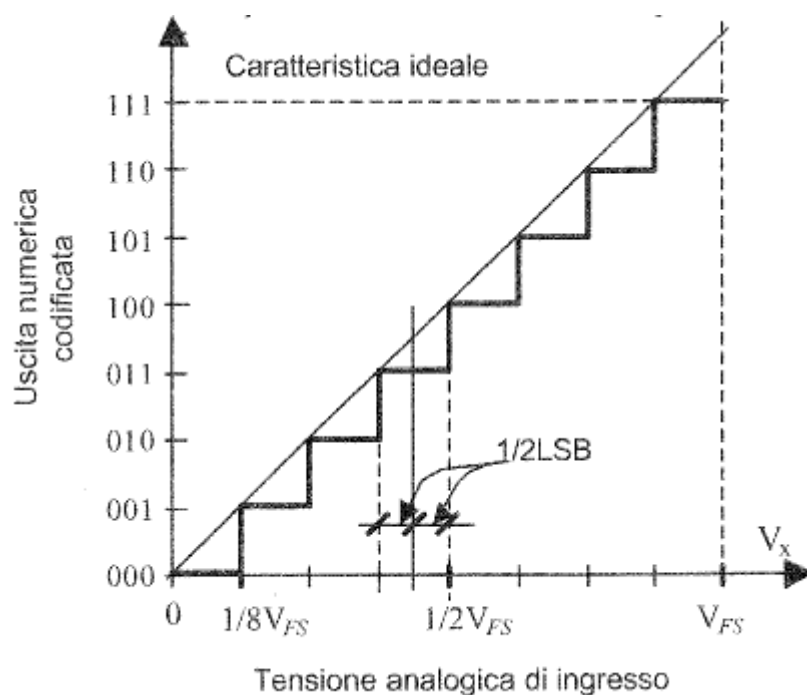


Fig. 5.1 Caratteristica ideale di un convertitore A/D a 3 bit.

L'errore di quantizzazione si riduce o aumentando il numero di bit o riducendo il fondoscala. L'errore di quantizzazione (ΔV_x) vale infatti:

$$\Delta V_X = \frac{V_{FS}}{2^N}, \quad (5.1)$$

dove N è il numero di bit.

Per dimezzare l'errore di quantizzazione è conveniente traslare il grafico di

$$\frac{1}{2^{(N+1)}} V_{F.S.}.$$

In questo modo il valore digitale corrispondente ad ogni intervallo è il valore centrale dell'intervallo e l'errore di quantizzazione diventa :

$$\Delta V_X^i = \frac{\Delta V_X}{2} \quad (5.2)$$

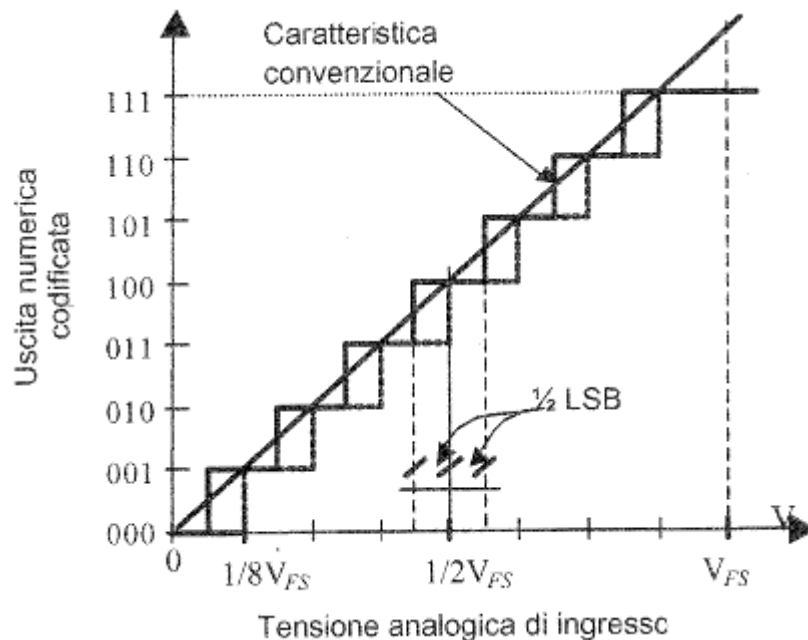


Fig. 5.2 Caratteristica centrata sui punti medi degli intervalli per dimezzare l'errore di quantizzazione

Il valore $\frac{1}{2^N} V_{F.S.}$ corrisponde al bit meno significativo (LSB) in quanto “salendo” i gradini del grafico il valore digitale aumenta di un bit.

Si può affermare che nel primo caso l'errore massimo è 1 LSB mentre nel secondo caso l'errore massimo si riduce a $\frac{1}{2}$ LSB.

5.2 Errore di guadagno

L'attenuatore, l'amplificatore e la tensione di riferimento sono un'altra fonte di incertezza. In particolare l'incertezza di questi valori causa un errore di guadagno. La pendenza della caratteristica ingresso uscita è unitaria in quanto l'uscita è la misura della tensione incognita. Un errore di guadagno provoca la variazione di tale pendenza (fig. 5.3).

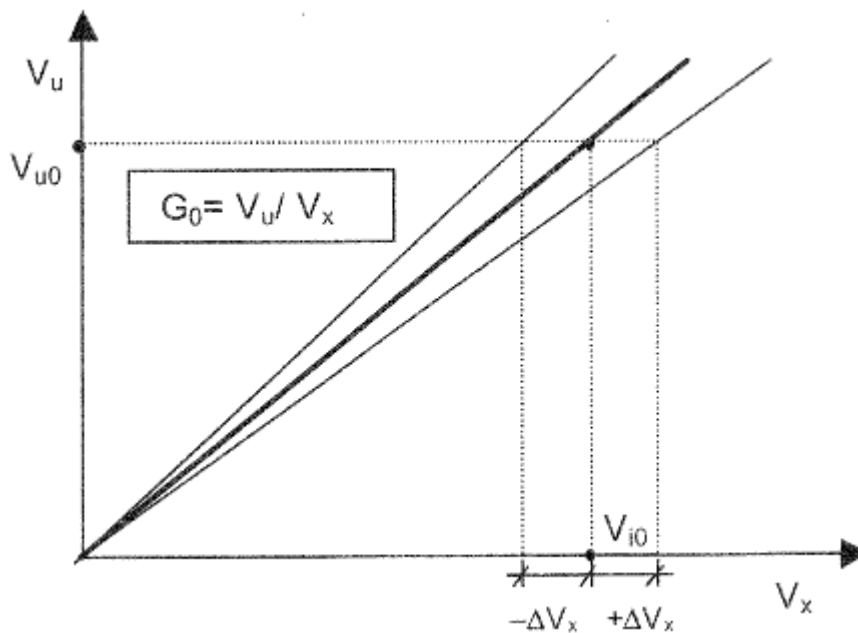


Fig 5.3 Caratteristiche nel caso di errore di guadagno, l'uscita è considerata analogica per maggiore chiarezza.

L'errore di guadagno è un errore proporzionale linearmente alla grandezza che si vuole misurare quindi l'incertezza relativa è costante. Si deve sapere qual è l'errore massimo di guadagno che si può avere per conoscere l'accuratezza dello strumento.

5.3 Errore di offset

Come è stato anticipato, nel voltmetro vi può essere un errore di offset dovuto soprattutto all'offset sugli amplificatori operazionali e ad eventuale carica residua sui condensatori. L'offset provoca un errore sulla caratteristica ingresso-uscita causando una traslazione orizzontale del grafico. Se tale offset è noto si può rimediare effettuando una correzione della misura; solitamente però l'offset è incerto, sia di valore che di segno. Come nel caso dell'errore di guadagno è fondamentale sapere la traslazione massima che il grafico può subire per conoscere l'accuratezza dello strumento.

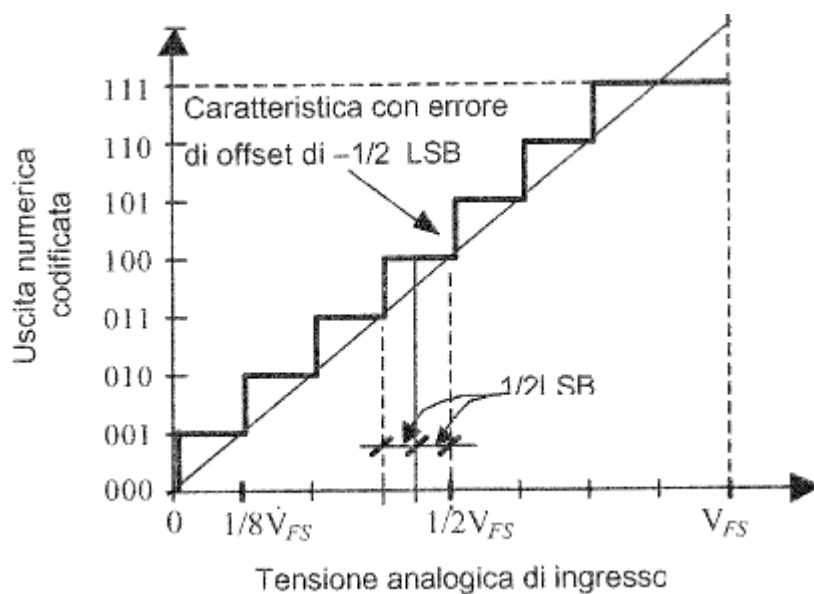


Fig 5.4 Caratteristica con errore di offset, in questo grafico l'errore di offset è di $1/2$ LSB.

5.4 Errore di non linearità

Oltre alle non idealità appena discusse vi sono altri effetti di non idealità causati dal fatto che i componenti utilizzati sono reali e non ideali. Ad esempio l'integratore di Miller non genera rampe perfettamente rettilinee, il valore delle resistenze varia al variare della temperatura, gli amplificatori non hanno una transcaratteristica perfettamente lineare. Tutti questi effetti di non idealità provocano un errore di non linearità che rende la "gradinata" della caratteristica non regolare. Si definiscono due tipi di non linearità: **non linearità differenziale** e **non linearità integrale**.

La **non linearità differenziale** indica, presi due valori di tensione, di quanto si discosta la pendenza del grafico I/O rispetto al valore unitario. Tale non linearità si può esprimere in questo modo: $(\Delta V_X)_{REALE} - (\Delta V_X)_{IDEALE}$.

La **non linearità integrale** indica invece di quanto si discosta la tensione misurata dalla tensione ideale in un punto del grafico e si esprime $(V_X)_{REALE} - (V_X)_{IDEALE}$.

Il caso dell'errore di offset può essere considerato come un caso particolare di non linearità, con errore differenziale nullo ed errore integrale costante. Al contrario l'errore di guadagno è un caso particolare di errore di non linearità con errore differenziale costante ed errore integrale nullo.

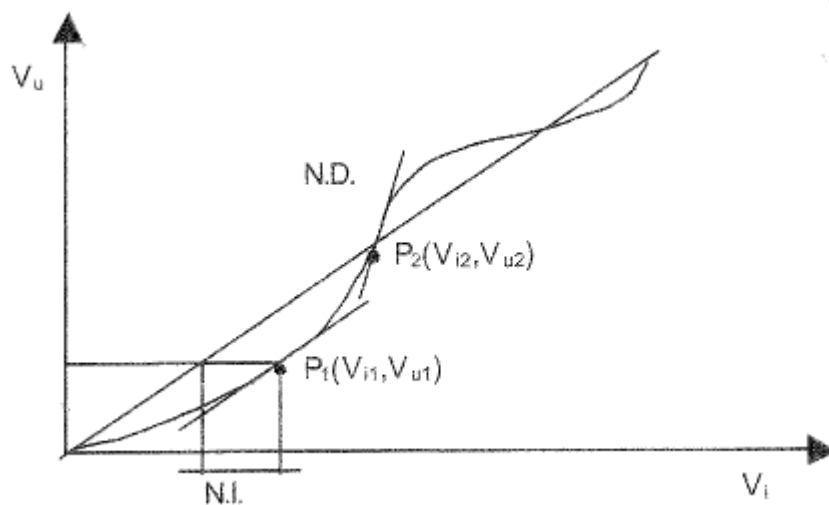


Fig 5.5 Caratteristica di trasferimento analogica con errore non lineare. Nel grafico è indicato l'errore di non linearità integrale massimo (P_1) e l'errore di non linearità differenziale massimo (P_2)

5.5 Accuratezza complessiva

Si è visto nei precedenti paragrafi che ogni singolo componente del multimetro digitale provoca un'incertezza che si ripercuote sulla caratteristica ingresso-uscita dello strumento. Per ottenere l'incertezza complessiva basta sfruttare il principio di sovrapposizione degli effetti; si ottiene un'incertezza che può essere scomposta in due contributi: un errore assoluto ed un errore relativo, entrambi costanti in tutto il campo di misura. L'errore assoluto è dato dagli errori di offset e di non linearità integrale mentre l'errore relativo è costituito dagli errori di guadagno.

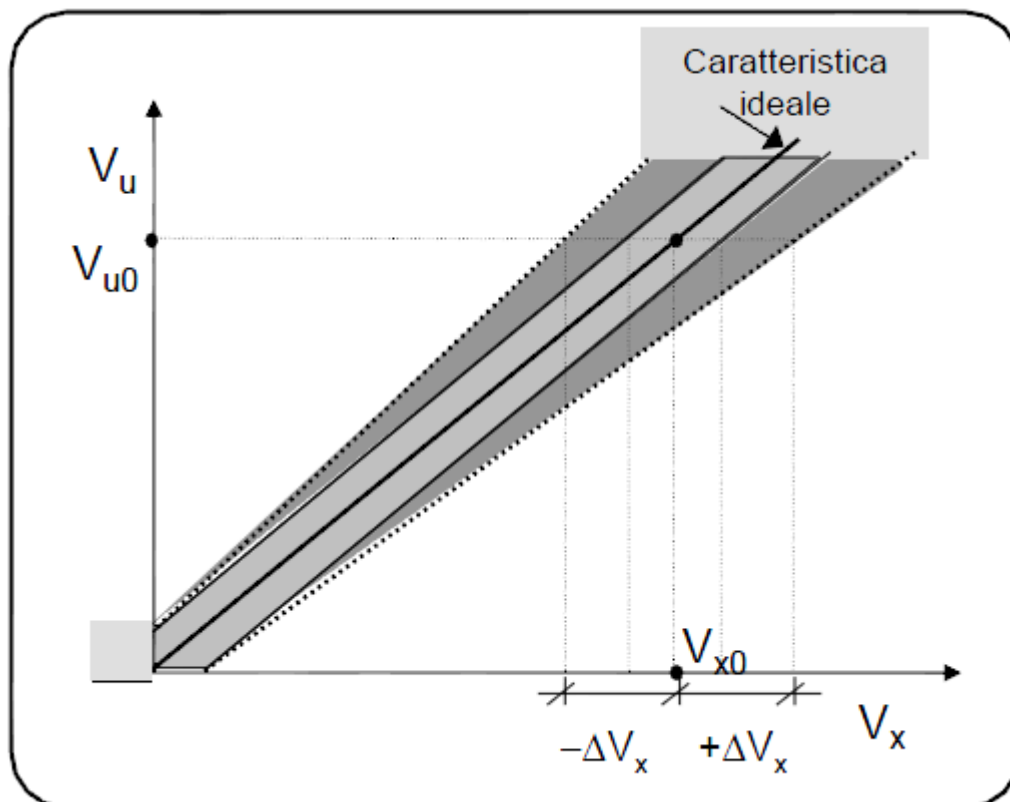


Fig. 5.6 Caratteristica analogica con la fascia di incertezza: vi è un contributo costante lungo tutto il grafico (grigio chiaro) e un contributo che varia linearmente con la tensione (grigio scuro)

La figura 5.6 mostra la caratteristica ideale con la fascia di incertezza nella quale si trova la caratteristica reale. La fascia di colore chiaro indica l'errore assoluto, costante lungo tutto il grafico; la fascia di colore scuro rappresenta l'errore relativo, che aumenta linearmente all'aumentare della tensione. Va precisato che l'errore assoluto varia a seconda del fondoscala considerato. L'incertezza dello strumento si ottiene considerando il contributo dei due errori: il contributo assoluto costante, espresso come percentuale del fondoscala e un contributo proporzionale al valore del misurando. L'incertezza d caso peggiore dello strumento ($|\Delta V_x|$) si può esprimere nei modi sottoelencati (dove per digit si intende il bit meno significativo - LSB):

$$|\Delta V_X| = |\epsilon_1 \% V_X + \epsilon_2 \% V_{F.S}| \quad , \quad (5.3)$$

$$|\Delta V_X| = |\epsilon_1 \% V_X + a mV| \quad , \quad (5.4)$$

$$|\Delta V_X| = |\epsilon_1 \% V_X + b \text{ digit}| \quad . \quad (5.5)$$

Come esempio, consideriamo le incertezze di misura dichiarate sul datasheet del multimetro da banco DMM 4050 della Tektronix, multimetro di notevole accuratezza. Nel datasheet è indicata l'accuratezza del multimetro a distanza di un giorno, tre mesi ed un anno dalla calibrazione dello strumento e in un preciso intervallo di temperatura (18-28°C). Se si utilizza lo strumento al di fuori di tale intervallo l'incertezza della misura aumenta. Nel datasheet è quantificata l'ulteriore incertezza da aggiungere se lo strumento è utilizzato al di fuori di questo intervallo di temperatura.

La prima tabella mostra l'accuratezza del voltmetro, la seconda l'accuratezza dell'ohmmetro. L'accuratezza è espressa come la somma della percentuale del valore misurato più la percentuale del fondoscala.

DMM4050 Accuracy

Accuracy is given as $\pm(\%$ measurement + $\%$ of range)

Range	24 Hour (23 °C \pm 1 °C)	90 Days (23 °C \pm 5 °C)	1 Year (23 °C \pm 5 °C)	Temperature Coefficient/°C Outside 18 to 28 °C
100 mV	0.0025 + 0.003	0.0025 + 0.0035	0.0037 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
1 V	0.0018 + 0.0006	0.0018 + 0.0007	0.0025 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
10 V	0.0013 + 0.0004	0.0018 + 0.0005	0.0024 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
100 V	0.0018 + 0.0006	0.0027 + 0.0006	0.0038 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
1000 V	0.0018 + 0.0006	0.0031 + 0.001	0.0041 + 0.001	0.0005 + 0.0001

DMM4050/4040 Accuracy

Accuracy is given as $\pm(\%$ measurement + $\%$ of range)

Range	24 Hour (23 °C \pm 1 °C)	90 Days (23 °C \pm 5 °C)	1 Year (23 °C \pm 5 °C)	Temperature Coefficient/°C Outside 18 to 28 °C
10 Ω	0.003 + 0.01	0.008 + 0.03	0.01 + 0.03	0.0006 + 0.0005
100 Ω	0.003 + 0.003	0.008 + 0.004	0.01 + 0.004	0.0006 + 0.0005
1 k Ω	0.002 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.01 + 0.001	0.0006 + 0.0001
10 k Ω	0.002 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.01 + 0.001	0.0006 + 0.0001
100 k Ω	0.002 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.01 + 0.001	0.0006 + 0.0001
1 M Ω	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.01 + 0.001	0.001 + 0.0002
10 M Ω	0.015 + 0.001	0.02 + 0.001	0.04 + 0.001	0.003 + 0.0004
100 M Ω	0.3 + 0.01	0.8 + 0.01	0.8 + 0.01	0.15 + 0.0002
1 G Ω	1.0 + 0.01	1.5 + 0.01	2.0 + 0.01	0.6 + 0.0002

5.6 Tecniche per minimizzare l'incertezza

Vediamo come utilizzare il multimetro digitale per minimizzare l'errore sulla misura effettuata. Come si è visto precedentemente ogni convertitore presenta delle incertezze la cui sovrapposizione determina l'accuratezza dello strumento dichiarata sul datasheet.

Quando l'operatore si appresta ad effettuare una misurazione deve essere consapevole che la misura che ottiene non corrisponde esattamente alla grandezza che si vuole misurare: per indicare correttamente il valore di una misura si deve pertanto indicare l'intervallo nel quale si trova il valore della misura effettuata. Tale intervallo si determina leggendo il valore dell'incertezza dello strumento sul datasheet.

L'operatore non può ridurre l'incertezza dello strumento, che dipende da fattori che non può modificare, ma deve mettersi nelle condizioni ottimali per minimizzare l'incertezza della misura.

Per prima cosa si devono evitare *errori grossolani*, per esempio l'errore di lettura del risultato o l'errore nel collegare il multimetro al circuito da testare. Gli errori di lettura sono frequenti nei multimetri analogici, perché vi possono essere errori di parallasse, mentre sono rari nel caso dei multimetri digitali, in quanto il display indica il risultato in forma numerica.

Inoltre per ridurre l'incertezza si deve utilizzare il fondoscala più basso possibile (chiaramente il fondoscala scelto deve però essere maggiore della grandezza da misurare).

Questo accorgimento minimizza l'incertezza in quanto viene ridotto il contributo dell'errore proporzionale al fondoscala. Infatti come si è visto precedentemente l'incertezza di ogni convertitore dipende sempre dal numero di cicli di clock contati.

L'incertezza relativa dei diversi convertitori è infatti proporzionale a $\frac{1}{N_x}$.

Scegliendo un fondoscala più elevato si riduce la tensione in ingresso al partitore e di conseguenza si riduce il numero di clock contati, aumentando l'incertezza di tale misura.

6 Reiezione dei disturbi

Misurando una grandezza elettrica vi possono essere dei disturbi che provocano la variazione della grandezza da misurare. Questi disturbi possono essere sia di modo differenziale che di modo comune.

6.1 Disturbo differenziale

I disturbi di modo differenziale si presentano quando una tensione inaspettata si somma alla tensione da misurare (fig 6.1);

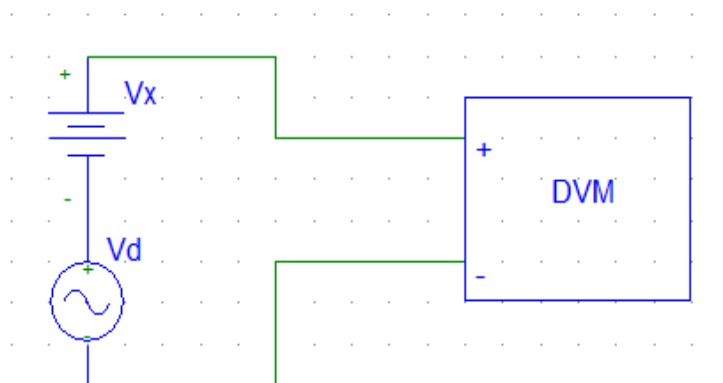


Fig 6.1 Rappresentazione circuitale del disturbo differenziale sovrapposto alla tensione da misurare.

I disturbi di modo differenziale possono essere solitamente di due tipi: disturbi impulsivi o disturbi sinusoidali.

Disturbi impulsivi

I disturbi impulsivi si hanno quando, per motivi più svariati, la grandezza da misurare (che si suppone costante) varia rapidamente per poi tornare al valore costante. Questo disturbo può capitare ad esempio quando vi sono improvvise variazioni di campo elettromagnetico nell'ambiente dove si sta effettuando la misura.

Se il convertitore è a valore istantaneo, la misura effettuata durante la presenza di tale disturbo risulta poco precisa in quanto non si avrà alcuna reiezione di tale disturbo. Il convertitore a valor medio invece, effettuando la media della tensione da misurare, attenua tale disturbo.

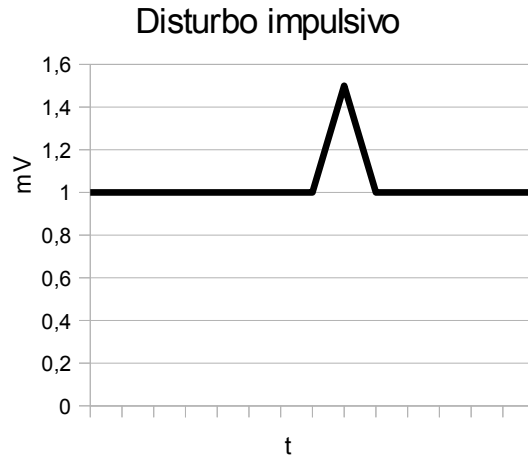


Fig. 6.2 Disturbo impulsivo, per semplicità di calcolo lo consideriamo di forma triangolare.

Supponiamo che il disturbo sia quello del grafico 6.2 , un disturbo di forma triangolare di durata ΔT e di tensione V_D (nel grafico 0.5 mV), dove V_X è la grandezza da misurare (nel grafico 1 mV).

La tensione misurata in un intervallo T che include al suo interno l'intervallo ΔT è la seguente:

$$V_{MIS} = \frac{1}{T} \int_0^T V dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_X dt + \frac{1}{T} \int_0^{\Delta_T} V_D dt = V + V_D \frac{\Delta_T}{2T} . \quad (6.1)$$

Pertanto se il tempo di misura è molto maggiore della durata del disturbo, il disturbo viene attenuato in maniera efficace. Per esempio se $T = 1$ s e $\Delta_T = 1$ ms la tensione misurata è:

$$V_{MIS} = V + 0.0005 V_D \quad (6.2)$$

Alla tensione da misurare in questo caso è aggiunta solo 1/2000 della tensione di disturbo.

Disturbi sinusoidali

A differenza dei disturbi impulsivi che si sovrappongono al segnale per brevi intervalli, i disturbi sinusoidali generalmente persistono durante tutto il tempo di misurazione. Pertanto al segnale da misurare (che anche in questo caso supponiamo costante) si sovrappone una tensione sinusoidale. Il nuovo segnale che viene misurato è quindi una sinusoide traslata alla tensione V_X , che è la vera tensione che si vuole misurare. Questo disturbo solitamente è causato dall'alimentazione del voltmetro se si utilizza la rete pubblica.

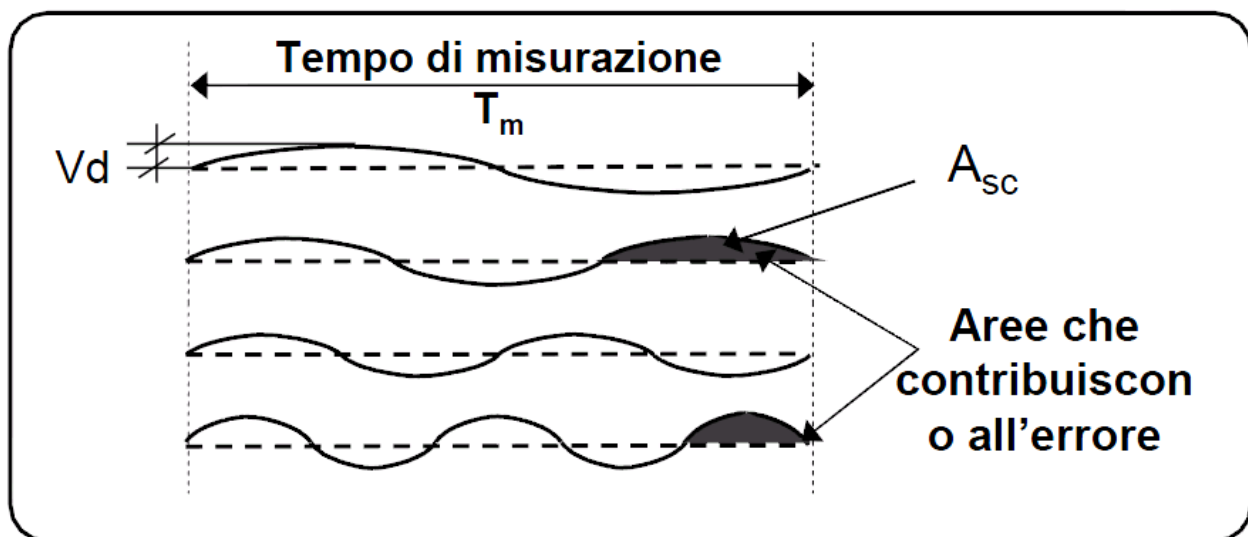


Fig. 6.3 Disturbi sinusoidali di diverse frequenze. Si vede che nel primo e nel secondo caso si ha una reiezione totale del disturbo, nel secondo e nel terzo caso invece la reiezione è minima in quanto l'errore è pari a una semionda. In particolare il disturbo a frequenza minore presenta un errore maggiore.

La sinusoide ha valor medio nullo se si considera un intervallo multiplo del periodo della sinusoide; questo è il caso ottimo perché il disturbo viene completamente azzerato. Il caso in cui vi è l'errore maggiore è quello in cui nell'intervallo di misura vi è un numero intero di periodi più un semiperiodo. Naturalmente vi sono tutti i restanti casi intermedi. Nella figura 6.3 sono mostrati due disturbi sinusoidali di frequenza diversa, nel caso in cui la sinusoide ha valor medio nullo e nel caso in cui vi è un intero semiperiodo di errore.

La tensione misurata è la seguente:

$$V_{MIS} = \frac{1}{T} \int_0^T V dt = V_X + \frac{1}{T} \int_0^T V_D \sin(2\pi f_D t) dt \quad (6.3)$$

Se $T = k T_D$, il secondo integrale si annulla e la tensione misurata è V_X .

Se $T = k T_D + \frac{T_D}{2}$, la tensione misurata diventa:

$$V_{MIS} = V_X + \frac{1}{T} \int_0^\pi V_D \sin(2\pi f_D t) dt = V_X + \frac{V_D}{\pi f_D T} \quad (6.4)$$

questo è il caso dove l'errore dovuto al disturbo sinusoidale è massimo.

Per ottenere il disturbo negli altri casi basta svolgere l'integrale.

Un parametro che indica il rapporto tra tensione da misurare e l'errore commesso a causa di tale disturbo è la *reiezione del rumore* (R_N).

$$R_N = \frac{V_X}{V_{ERR}} \quad (6.5)$$

$$\text{dove } V_{ERR} = \frac{1}{T} \int_0^T V_D \sin(2\pi f_D t) dt \quad (6.6)$$

sostituendo si ottiene:

$$R_N = \frac{V_X T}{\int_0^T V_D \sin(2\pi f_D t) dt} \quad (6.7)$$

R_N indica, al variare della frequenza del disturbo (f_D) e del tempo di misurazione, il rapporto tra la tensione da misurare e l'errore.

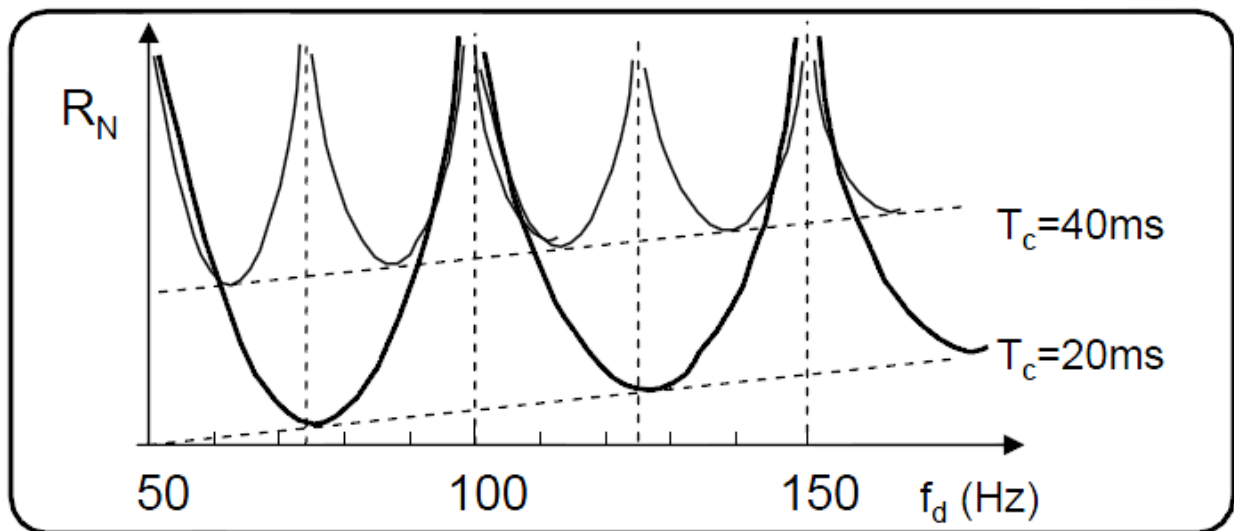


Fig. 6.4 Il grafico mostra la reiezione del disturbo sinusoidale al variare della frequenza del disturbo, considerando come tempo di conversione 20 ms e 40 ms.

Per come è definita la reiezione del rumore, essa è infinita se l'errore è nullo ($T_M = k T_D$); un valore basso di R_N indica invece un errore maggiore. In figura 6.4 è visualizzata la reiezione del rumore al variare della frequenza del disturbo considerando due tempi di conversione, 20ms e 40 ms. Nel grafico si nota che quando il tempo di conversione è multiplo del periodo del disturbo sinusoidale la reiezione va all'infinito. I minimi invece si hanno quando si considerano multipli di periodi più un semiperiodo. Si osserva anche che aumentando il tempo di conversione, a parità di frequenza del disturbo, la reiezione aumenta. Questo accade perché ogni intervallo include più sinusoidi e pertanto i semiperiodi sono più piccoli. Per lo stesso motivo, a parità di tempo di conversione, aumentando la frequenza del disturbo, la reiezione migliora. Questo ragionamento si comprende intuitivamente osservando la figura 6.3 nella quale è messo in evidenza che, preso un tempo di conversione costante e

considerando due casi di errore massimo, l'errore nel caso di disturbo a frequenza minore è maggiore dell'errore con un disturbo a frequenza maggiore. Calcolando l'integrale nella 6.7 è possibile calcolare la R_N per ogni caso.

Come è stato premesso il disturbo sinusoidale è presente se si alimenta il multimetro utilizzando la rete pubblica. Questo perché il multimetro viene alimentato utilizzando una tensione continua, ottenuta a partire dalla tensione alternata (50 Hz) della rete pubblica. Per questo motivo sono presenti disturbi sinusoidali a 50 Hz di frequenza. Per ottenere la reiezione di tali disturbi solitamente i multimetri hanno un tempo di conversione multiplo di 20 ms, considerando che 50 Hz è l'inverso di 20 ms.