

Voltmetri, amperometri e multimetri

1 - Strumenti analogici

Premessa

I voltmetri, gli amperometri e i multimetri sono strumenti di misura di base che vengono realizzati sia in forma analogica che digitale.

I modelli digitali si sono ormai imposti sul mercato in quanto, normalmente, consentono di ottenere un più favorevole rapporto costo-prestazioni. Tuttavia gli strumenti analogici risultano ancora diffusi, soprattutto nelle installazioni e nelle dotazioni meno recenti.

Gli strumenti elettromeccanici forniscono un'indicazione della misura mediante un indice che si sposta su una scala graduata. L'azione della grandezza elettrica applicata in ingresso produce una coppia motrice su un equipaggio mobile, cui è solidale l'indice (vedi Fig.1.1).

Sull'equipaggio mobile agisce anche una coppia resistente prodotta dalla reazione elastica di una molla antagonista. All'applicazione dello stimolo elettrico, lo strumento segue un transitorio di deflessione, durante il quale agiscono, oltre alle due coppie motrice e resistente, anche altre coppie, di inerzia (le masse) e di tipo viscoso (attriti). Alla fine del transitorio si raggiunge una posizione di equilibrio, in cui la coppia motrice è uguale alla coppia della molla antagonista.

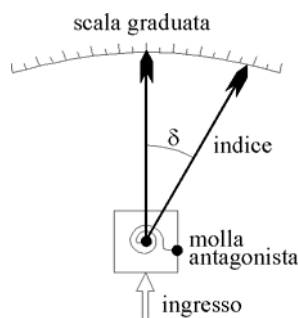


Fig.1.1 - *Strumento elettromeccanico.*

L'azione meccanica della grandezza elettrica sull'equipaggio mobile si può manifestare in base a diversi principi fisici: l'interazione fra una corrente e un campo magnetico, l'interazione fra correnti, l'interazione fra cariche elettriche. Fra i dispositivi analogici, quello che presenta ancora interesse è lo strumento magnetoelettrico.

Tale strumento verrà presentato anche perché consente di introdurre in modo semplice concetti di validità generale per gli strumenti di misura.

Lo strumento magnetoelettrico

Lo strumento magnetoelettrico funziona producendo la deflessione di un indice su una scala graduata. È costituito da un magnete permanente fra le cui espansioni polari è disposto un

nucleo di materiale ferromagnetico di forma cilindrica (Fig.1.2).

Attorno al cilindro sono poste delle spire di filo conduttore, avvolte su un telaio che è libero di ruotare. Sul telaio è fissato l'indice dello strumento, che si sposta su una scala graduata.

Le N spire sono percorse dalla corrente continua I , immessa nello strumento.

Pertanto lo strumento magnetoelettrico è essenzialmente un misuratore di corrente.

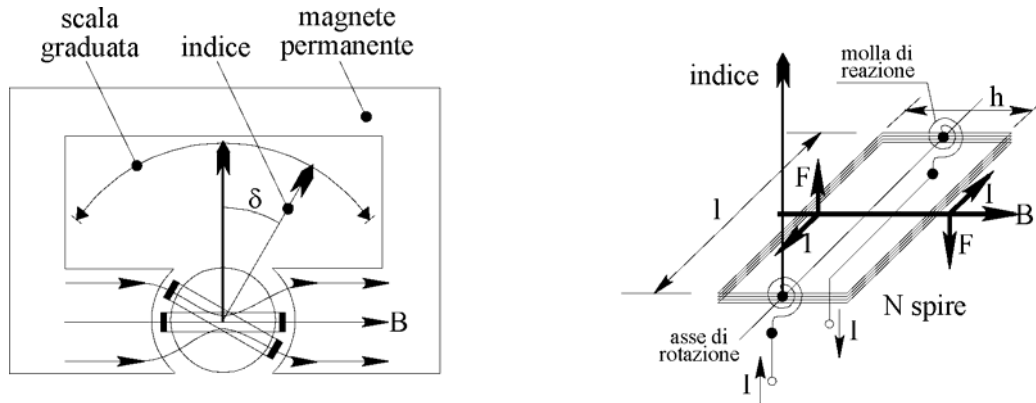


Fig.1.2 - Strumento magnetoelettrico.

Nella pratica la corrente I viene portata alla bobina tramite le molle di reazione a spirale.

L'interazione fra l'induzione magnetica B e la corrente continua I che percorre le N spire origina delle forze F e quindi una coppia motrice C_m agente sulle spire dell'equipaggio mobile, che può in tal modo ruotare, spostando l'indice sulla scala graduata.

La funzione del nucleo cilindrico di materiale ferromagnetico è quella di mantenere un piccolo spazio, di spessore costante con la posizione angolare dell'equipaggio mobile, in modo tale che le forze F risultino sempre normali al piano delle spire e abbiano pertanto un braccio costante rispetto all'asse di rotazione.

Questo accorgimento consente di ottenere una scala di lettura con graduazione uniforme

Con riferimento allo schema di Fig.2.1, si ha quindi:

$$F = B \cdot NI \cdot l \Rightarrow C_m = F \cdot h = B \cdot NI \cdot lh = k_m \cdot I \quad (1.1)$$

Come l'equipaggio mobile si sposta, le molle di reazione elastica esercitano una coppia resistente C_r che risulta proporzionale alla deflessione angolare δ dell'equipaggio mobile, cui è solidale l'indice. All'equilibrio la coppia motrice C_m è bilanciata dalla coppia resistente C_r .

$$\left. \begin{array}{l} C_m = k_m \cdot I \\ C_r = k_r \cdot \delta \end{array} \right\} C_m = C_r \Rightarrow \delta = \frac{k_m}{k_r} I = S \cdot I \quad (1.2)$$

La deviazione δ risulta quindi proporzionale alla corrente continua I da misurare.

La corrente I non può superare, in pratica, valori di milliampere o di microampere, per non alterare la costante elastica delle molle, a causa delle variazioni di temperatura.

Lo strumento magnetoelettrico risulta pertanto un milliamperometro o un microamperometro (galvanometro d'Arsonval).

Il coefficiente di proporzionalità S dipende dalle caratteristiche geometriche e funzionali dello strumento e rappresenta la sensibilità in corrente. Questa sensibilità fornisce il numero di divisioni sulla scala che corrispondono alla corrente da misurare; viene data tipicamente con riferimento ai milliampere [div/mA] o ai microampere [div/ μ A].

Voltmetro e amperometro

A) Voltmetro

La resistenza propria R_m del galvanometro è dell'ordine delle centinaia o poche migliaia di ohm e quindi la tensione che porta l'indice a fondoscala risulta assai piccola.

Infatti, se ad esempio il galvanometro avesse un valore massimo (di fondoscala) per la corrente $I_{FS} = 50 \mu\text{A}$ e una resistenza propria $R_m = 2000 \Omega$, risulterebbe un valore di tensione al fondoscala pari a $V_{FS} = R_m \cdot I_{FS} = 2000 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 100 \text{ mV}$.

Nelle misure di tensione lo strumento potrebbe essere solo un millivoltmetro.

Per accrescere la portata dello strumento come voltmetro si inserisce una resistenza R_v in serie al galvanometro M , come riportato in Fig.1.3A.

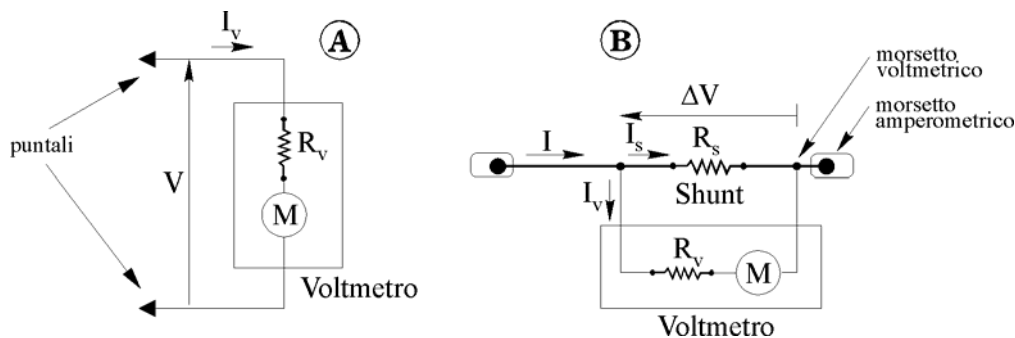


Fig.1.3 - A) voltmetro con resistore addizionale; B) amperometro con shunt.

In tale figura non è stata indicata la resistenza propria R_m del galvanometro M , il cui valore può talvolta risultare, come si vedrà nel seguito, trascurabile rispetto a R_v .

Se indichiamo con I_{FS} il valore di fondoscala in corrente del galvanometro e con V_{FS} il generico valore di fondoscala per la tensione che si vuole misurare, la resistenza addizionale R_v da porre in serie risulta:

$$R_v = \frac{V_{FS}}{I_{FS}} - R_m = S_V V_{FS} - R_m \quad \text{con} \quad S_V = \frac{1}{I_{FS}} \quad (1.3)$$

La quantità S_V è detta sensibilità del voltmetro, espressa di solito in $[\text{k}\Omega/\text{V}]$.

Esempio: supponiamo che sia $I_{FS} = 50 \mu\text{A}$ e $R_m = 2000 \Omega$;

se la tensione richiesta a fondoscala è $V_{FS} = 100 \text{ V}$, allora $V_{FS}/I_{FS} \approx 2 \text{ M}\Omega$ e $S_V = 20 \text{ k}\Omega/\text{V}$.

Si nota che la resistenza $R_v = (2 \text{ M}\Omega - 2000 \Omega)$ praticamente è uguale a V_{FS}/I_{FS} .

B) Amperometro

Per estendere l'impiego dello strumento magnetoelettrico a correnti più elevate si impiegano resistenze in parallelo (derivatori o *shunt*). Con riferimento alla Fig.1.3B, si ottiene:

$$\Delta V = R_s I_s = R_v I_v \Rightarrow I_s = \frac{R_v}{R_s} I_v \Rightarrow I = I_s + I_v = \left(\frac{R_v}{R_s} + 1 \right) I_v \quad (1.4)$$

Quindi si può risalire al valore della corrente di linea I dalla misura di una sua parte I_v .

Per esempio, avendo uno strumento con corrente di fondoscala $I_{FS} = 10 \text{ mA}$ e volendo misurare correnti dell'ordine di 10 A a fondoscala, la resistenza dello shunt R_s deve essere circa mille volte minore della resistenza del circuito voltmetrico R_v .

La misura della corrente I è in sostanza ricondotta alla misura della caduta di tensione ΔV ai capi dello shunt mediante un millivoltmetro. Se la resistenza di ingresso del voltmetro è di

valore sufficientemente elevato, praticamente tutta la corrente di linea I attraverserà lo shunt R_s e si avrà con buona approssimazione: $I = \Delta V/R_s$.

I derivatori presentano spesso quattro morsetti: due amperometrici, per la connessione alla linea, e due voltmetrici, per la misura della caduta di tensione sullo shunt.

In tal modo si riesce a separare dal circuito di misura voltmetrico le resistenze di contatto delle connessioni amperometriche, che potrebbero introdurre errori consistenti.

Strumento universale

In Fig.1.4 è riportato lo schema di un comune tester analogico, per la misura di tensioni e correnti con diversi valori di fondoscala. La possibilità di selezionare le portate è dovuta al corredo di shunt R_s e di resistori addizionali R_v e dei relativi commutatori.

Nella stessa Fig.1.4 è riportato un diagramma che rappresenta la commutazione delle portate nel caso di misura delle tensioni. Per ciascuna portata viene garantito che non si superi la corrente massima I_{FS} ammissibile nello strumento.

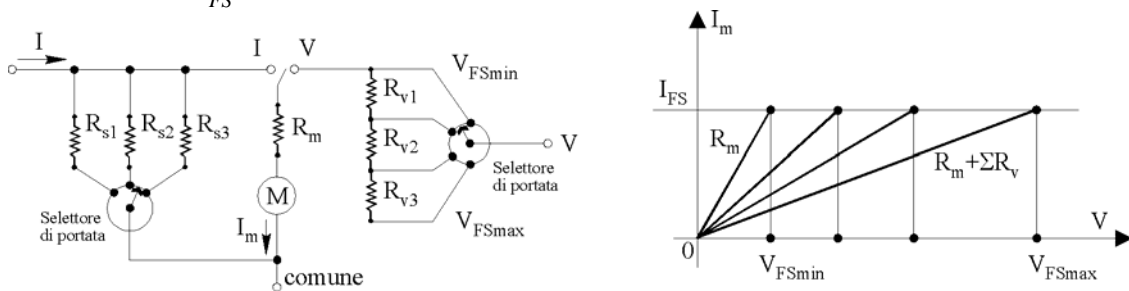


Fig.1.4 - Strumento universale.

Funzionamento in corrente alternata

Lo strumento magnetoelettrico consente anche le misure di tensione in regime alternativo sinusoidale se viene dotato di un opportuno raddrizzatore.

Un semplice circuito raddrizzatore, riportato in Fig.1.5, utilizza un diodo D.

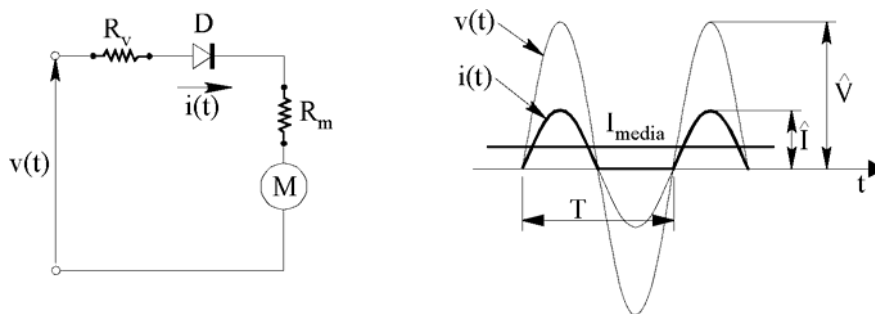


Fig.1.5 - Funzionamento in c.a. per lo strumento magnetoelettrico.

La conduzione del diodo D, nel funzionamento ideale, avviene con le seguenti modalità:

$$\begin{array}{lll} v(t) > 0 & \text{Diodo ON} & i(t) = v(t)/(R_v + R_m) \\ v(t) < 0 & \text{Diodo OFF} & i(t) = 0 \end{array}$$

Gli andamenti temporali delle tensioni e delle correnti sono riportati nella stessa Fig.1.5.

In regime alternativo sinusoidale, siamo normalmente interessati al valore efficace.

Se $v(t)$ è una tensione sinusoidale; il suo valore efficace è per definizione:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{V}^2 \sin^2 \omega t dt} \quad (1.5)$$

La corrente circolante nel dispositivo di misura, in assenza del diodo, sarebbe anch'essa alternativa sinusoidale e avrebbe valore di picco ed efficace, rispettivamente:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}}{R_v + R_m} \quad I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{eff}}{R_v + R_m} \quad (1.6)$$

Viceversa, inserendo il diodo come in Fig.1.5, si ha la conduzione solo durante le semionde positive con un regime di corrente unidirezionale pulsante.

Si noti che il valore di cresta della corrente $i(t)$ risulta lo stesso, sia per il regime alternativo sinusoidale che per quello unidirezionale pulsante.

Il valor medio della corrente $i(t)$, che è nullo in regime alternativo sinusoidale, diventa nel caso del regime pulsante pari a:

$$I_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \hat{I} \sin \omega t dt = \frac{\hat{I}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{eff} = \frac{I_{eff}}{2,22} \quad (1.7)$$

D'altra parte, lo strumento magnetoelettrico è in grado di reagire solo alle componenti continue di corrente; mentre le componenti alternative contenute nella corrente pulsante vengono filtrate dall'inerzia dell'equipaggio mobile.

Allora la deflessione dell'indice dello strumento risulta dipendere solo dalla componente continua I_{media} della corrente.

In particolare, se lo strumento presenta una certa deflessione δ quando gli viene applicata una tensione continua V_{cc} , la stessa deflessione sarà ottenuta anche in corrente alternata, se il valore efficace della tensione sinusoidale applicata risulta $V_{eff} = 2,22 V_{cc}$.

Si conclude che la sensibilità voltmetrica in c.a. è 1/2,22 volte (45%) di quella in c.c.

Per tale motivo si preferisce il raddrizzamento a doppia semionda, il cui schema è rappresentato in Fig.1.6. In tal caso, la conduzione dei diodi avviene con le seguenti modalità:

$$\begin{array}{lll} v(t) > 0 & (D_1 \text{ e } D_2) \text{ ON} & (D_3 \text{ e } D_4) \text{ OFF} \\ v(t) < 0 & (D_3 \text{ e } D_4) \text{ ON} & (D_1 \text{ e } D_2) \text{ OFF} \end{array}$$

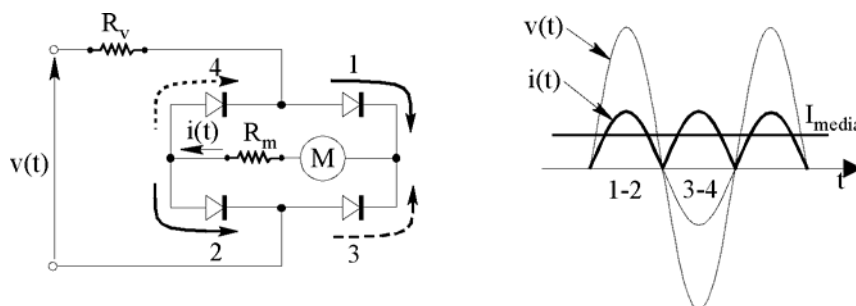


Fig.1.6 - Raddrizzamento a doppia semionda.

Quindi raddoppia il valore medio della corrente che viene sentito dallo strumento, a parità di valore di cresta della corrente $i(t)$. Pertanto si ottiene:

$$I_{media} = \frac{2}{\pi} \hat{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{eff} = \frac{I_{eff}}{1,11} = \frac{I_{eff}}{F} \quad (1.8)$$

F è il fattore di forma: definito in generale come il rapporto fra il valore efficace e il valore medio del segnale. Il fattore di forma F , nel caso sinusoidale, vale appunto 1,11.

In pratica lo strumento è tarato direttamente in valori efficaci, assumendo che vengano applicati segnali sinusoidali.

Consegue che per segnali non sinusoidali le indicazioni non sono corrette.

La classe di precisione

La classe di precisione è il valore massimo dell'errore che si può avere in qualunque punto della scala, espresso in percento ($c\%$) del valore di fondoscala (V_{FS}):

$$E_{\max} = \frac{c\%}{100} V_{FS} \quad (1.9)$$

Esempio:

Un voltmetro con portata di 500 V e classe di precisione $c = 0,5\%$ presenta un errore massimo, in ogni punto della scala, pari a: $E = (0,5/100) \cdot 500 = 2,5$ V.

(La dizione errore, benchè meno appropriata rispetto a incertezza, è molto diffusa quando si parla degli strumenti elettromeccanici).

Strumenti elettrodinamici

Gli strumenti elettrodinamici hanno ormai solo interesse storico. In passato venivano impiegati come wattmetri. Il wattmetro elettrodinamico (vedi Fig.1.7) è costituito da una bobina fissa attraversata dalla corrente i_f (pari alla corrente i in transito nella linea, a parte eventuali piccoli errori di inserzione) e una bobina mobile attraversata dalla corrente i_m (legata alla tensione u dalla relazione $i_m = u/R_v$, essendo R_v la resistenza propria della bobina).

Sull'equipaggio mobile agisce una coppia motrice C_m dovuta all'interazione di i_m con l'induzione B prodotta dalla corrente i_f . La coppia motrice C_m risulta dunque proporzionale al loro prodotto e quindi alla potenza istantanea $p(t)$.

$$C_m(t) = k \cdot i_f(t) i_m(t) = k \cdot i(t) \frac{u(t)}{R_v} = k' p(t) \Rightarrow C_m|_{media} = k' UI \cos \varphi \quad (1.10)$$

In regime alternativo, la deflessione δ viene prodotta solo dalla coppia motrice media.

Infatti le inerzie non consentono all'equipaggio mobile di seguire variazioni di coppia a frequenza elevata (oltre qualche hertz), che dunque non vengono riprodotte.

Pertanto l'indicazione δ è proporzionale alla potenza media P .

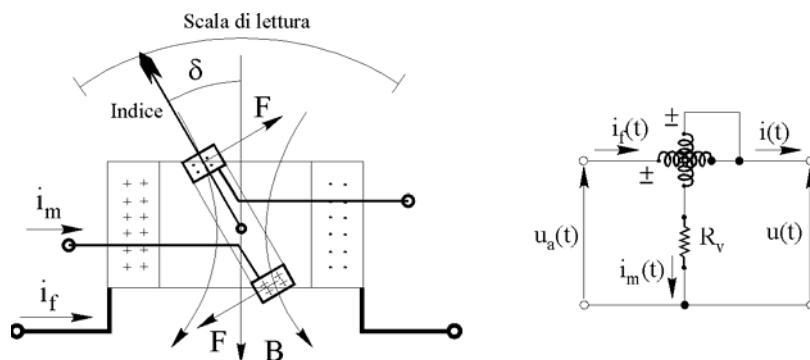


Fig.1.7 - Strumento elettrodinamico.

2 - Voltmetri e multimetri digitali

Voltmetro digitale (DVM, Digital Volt Meter)

I voltmetri digitali misurano tensioni continue (DC) e alternative (AC) o comunque variabili. Normalmente la portata massima per le tensioni è non superiore a 1000 V; la portata minima è dell'ordine dei millivolt. Esiste la possibilità di impostare portate intermedie con selettori manuali o automatici, agendo sul blocco Attenuatore o Amplificatore (vedi Fig.2.1).

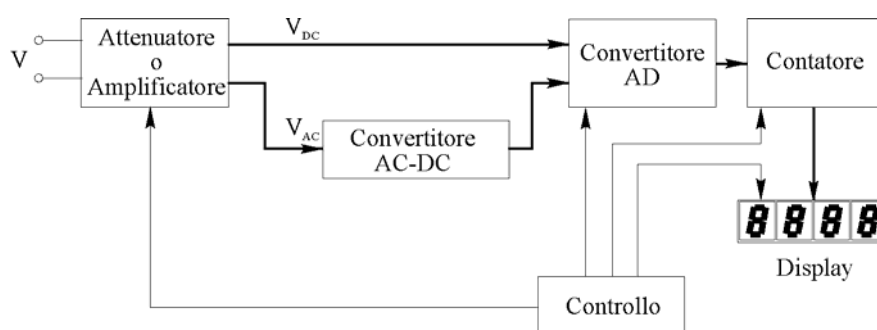


Fig.2.1- Schema per uno voltmetro digitale.

Attenuazione e amplificazione

Esistono casi in cui il segnale applicato allo strumento deve essere attenuato. Si può ricorrere a un partitore resistivo, secondo lo schema di Fig.2.2 dove sono impiegate le resistenze di $9\text{M}\Omega$, $900\text{k}\Omega$ e $100\text{k}\Omega$, per un totale di $10\text{M}\Omega$. In tale circuito, se si ammette un comportamento ideale dell'amplificatore operazionale, questo non assorbe alcuna corrente al morsetto non invertente (+); pertanto la tensione v_{in} applicata in ingresso allo strumento vede sempre una resistenza pari alla somma delle resistenze del partitore (nel caso illustrato il valore sufficientemente alto di $10\text{M}\Omega$).

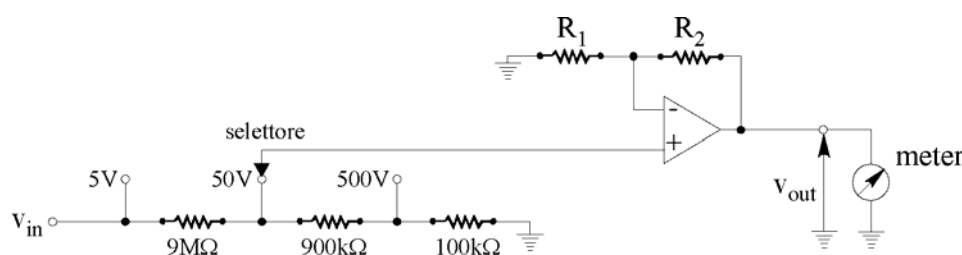


Fig.2.2- Partitore per l'attenuatore in ingresso.

Se, per esempio, la tensione applicata v_{in} ha un valore inferiore a 50V, il selettore di portata è posizionato sul valore corrispondente. Allora la tensione sul morsetto non invertente dell'operazionale è inferiore a 5V, che costituisce un valore idoneo per l'applicazione diretta in ingresso all'operazionale.

Il selettore di portata verrà posizionato su una delle tre posizioni contraddistinte dai valori 5V, 50V e 500V, a seconda del valore della tensione in ingresso. È bene iniziare la misurazione partendo dalla portata più alta, passando poi a quelle più basse, se necessario.

Nei multimetri di maggior pregio la rete attenuatrice in AC è separata da quella in DC (per motivi di comportamento in frequenza, che richiedono una compensazione). Più spesso si ha un unico attenuatore d'ingresso.

Per amplificare un segnale sotto la portata minima (5 V, per lo schema in figura) si imposta il guadagno dell'amplificatore in configurazione non invertente al valore desiderato.

Per la configurazione in Fig.2.2, il guadagno è:

$$G = v_{out}/v_{in} = (R_1 + R_2)/R_1 \text{ e si ha: } R_2 = R_1 (G - 1).$$

Esempio: Se $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ e si vuole un guadagno $G = 100$, allora: $R_2 = 99 \text{ k}\Omega$.

Se le resistenze R_1 e R_2 che formano la rete di retroazione dello stadio sono di valore uguale, il guadagno a ciclo chiuso è pari a 2 e la tensione d'uscita v_{out} a fondoscala risulta di 10V.

La strumentazione elettronica, in generale, prevede il ricorso a una alimentazione propria (rete o batteria) indipendente dalla grandezza da misurare. Questa particolarità consente di non caricare il circuito sotto prova, evitando di sottrargli l'energia necessaria per la presentazione o l'utilizzo del risultato di misura (vedi schema di Fig.2.3).

Gli strumenti elettronici possono conservare ancora la forma classica di visualizzazione, mediante la deviazione di un indice su una scala graduata, ma più spesso si preferisce adottare la forma di presentazione numerica, mediante indicazione di un numero su una *display*.

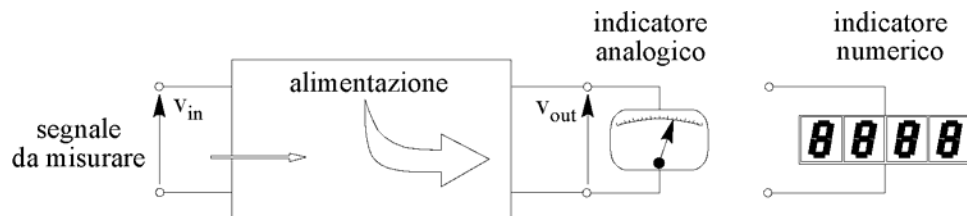


Fig.2.3 - Riduzione dell'effetto di carico per la strumentazione elettronica.

Voltmetri TRMS

Nelle misure di tensione in *DC*, il segnale in uscita dall'attenuatore viene direttamente applicato al convertitore analogico/digitale (*AD*). Nelle misure di tensione in *AC*, viceversa, il circuito d'ingresso prevede una ulteriore importante sezione circuitale costituita dal convertitore *AC-DC* (vedi lo schema a blocchi di Fig.1.2).

Questo convertitore, tipicamente, è un convertitore del tipo *TRMS-to-DC*, ossia produce in uscita un segnale di tensione continuo, con valore pari al vero valore efficace (*True Root Mean Square*) del segnale applicato in ingresso. In tal modo il convertitore analogico/digitale (*AD*) tratta sempre segnali di tensione continui che possono essere digitalizzati tramite convertitori analogico/digitali accurati, per esempio del tipo a conteggio di impulsi.

Tali dispositivi saranno esaminati in seguito, quando verranno trattati i convertitori analogico-digitali, nonché gli elementi dell'elettronica digitale e analogica propri della strumentazione di misura.

Dispositivi di visualizzazione

I dispositivi di visualizzazione nei multimetri digitali sono normalmente display a sette segmenti, caratterizzati dal loro numero di cifre. Ciascuna cifra piena può assumere ogni valore intero compreso fra 0 e 9. Pertanto un display, ad esempio, con tre cifre piene può rappresentare il massimo valore 999.

Il costruttore dichiara spesso un numero di cifre con significato pieno più mezza cifra, ad esempio 3½. La mezza cifra (a sinistra del display, vedi Fig.2.4) non può assumere tutti i valori fra 0÷9, ma, per esempio, solo i valori 0 ed 1. In tal caso, il massimo valore che può essere rappresentato su quel display con 3 ½ cifre risulta 1999 (*Overrange del 100%*).

Il vantaggio di tale consuetudine può essere posto in luce con un esempio: si abbia un

voltmetro con tre cifre piene (quindi senza la mezza cifra), impiegato in misure attorno a 1V. Nel passaggio da 999 mV a 1,001 V, la variazione di 2 mV impone un cambiamento di scala. Le letture su un display con tre cifre piene saranno .999 V e 1.00 V. Nel cambiamento di scala si perde quindi una cifra decimale. Se viceversa il voltmetro è con 3½ cifre, le indicazioni sono rispettivamente 0.999 V e 1.001 V, mantenendo l'informazione sull'ultima cifra. (Nota: sul display dei multimetri digitali il separatore dei decimali è il punto).

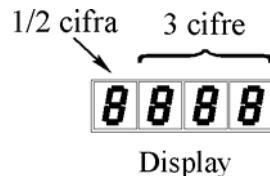


Fig.2.4 - Il display a sette segmenti.

I multimetri digitali

I multimetri digitali (*Digital MultiMeter, DMM*) sono la naturale evoluzione dei voltmetri digitali e realizzano normalmente almeno le funzioni di amperometri e ohmmetri per le misure di corrente e di resistenza. Queste grandezze elettriche, per poter essere misurate, sono preventivamente convertite in tensione (vedi Fig.2.5 e 2.6).

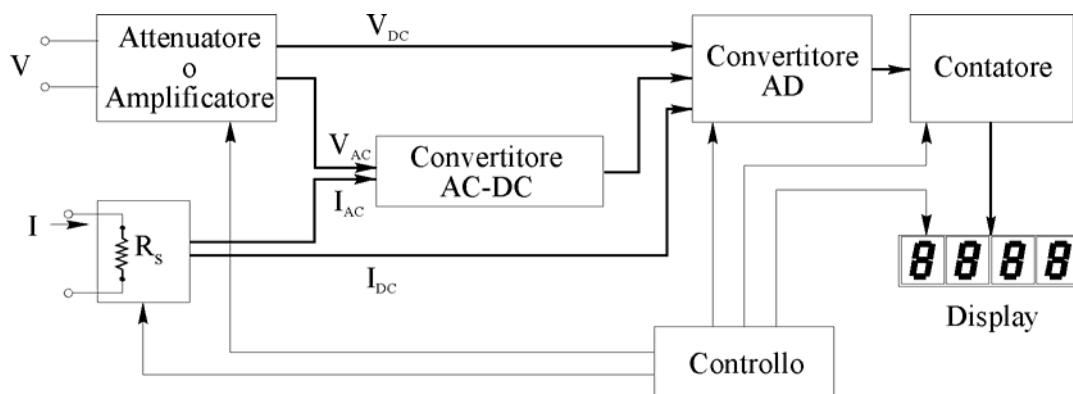


Fig.2.5 - Schema base per la misura di corrente.

Misure di corrente

Normalmente le misure di corrente avvengono tramite una resistenza tarata R_s , interna allo strumento. La corrente I viene fatta passare nella resistenza R_s misurando la caduta di tensione $R_s I$ che la corrente in esame provoca ai suoi capi.

In tal modo la misura di corrente viene ricondotta alla misura di una tensione, che viene fatta dal voltmetro interno allo strumento, e per la quale vale tutto quanto detto in precedenza.

Le misure di resistenza

Le misure di resistenza si ottengono iniettando una corrente nota I_0 , prodotta da un generatore di corrente costante, interno allo strumento, nella resistenza incognita R_x e misurando, anche in questo caso, la caduta di tensione agli estremi.

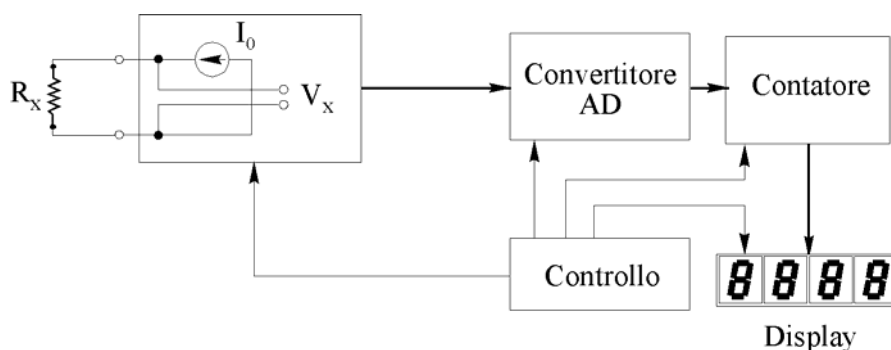


Fig.2.6 - Schema base per la misura di resistenza.

Misura di resistenza a quattro morsetti

Per le resistenze di valore più basso, i multimetri digitali dispongono spesso di un sistema a quattro morsetti (metodo Kelvin), vedi Fig.2.7. Attraverso la prima coppia di morsetti (Hi, Lo) lo strumento inietta la corrente nota I_0 nella resistenza incognita R_x . Questa corrente passa attraverso le boccole (Hi, Lo) dove incontra la resistenza di contatto R_c che falserebbe la misura standard a due fili (voltmetro V in posizione $\Omega 2w$).

Per evitare questo fatto, con l'altra coppia di morsetti di *sensing* (Hi, Lo) viene prelevata la tensione su due punti più vicini al resistore incognito R_x . Operando in tal modo (voltmetro V in posizione $\Omega 4w$), le cadute di tensione sulle resistenze di contatto R_c , presenti sulle boccole che portano la corrente I_0 al resistore in prova R_x , possono essere escluse dalla tensione da misurare, ottenendo una misura più accurata.

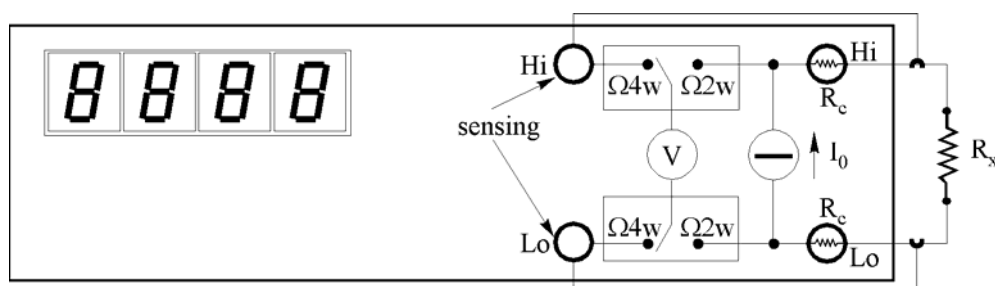


Fig.2.7 - Misure di resistenza a due ($\Omega 2w$) e quattro ($\Omega 4w$) morsetti.

I multimetri commerciali sono infine dotati di funzioni più o meno sofisticate per il controllo e la gestione della misura: per esempio è frequente la funzione di *autorange*, che consiste nella predisposizione automatica della portata più opportuna per la grandezza sotto misura.

3 - Specifiche degli strumenti

Gli strumenti di misura vengono normalmente caratterizzati da una serie di specifiche, più o meno dettagliate, che vengono di solito fornite dal costruttore.

Nel seguito si riportano quelle che si incontrano più di frequente.

Portata

La portata (*nominal range*) di uno strumento è l'insieme delle indicazioni ottenibili, con una

particolare predisposizione dei suoi comandi di impostazione. Per esempio, in voltmetro predisposto sulla portata di 100 V misura i valori di tensione compresi fra 0 V e 100 V. I multimetri, tipicamente, hanno diverse portate per ciascuna grandezza misurabile.

Risoluzione

La risoluzione (*resolution*) di un dispositivo è la più piccola variazione, nel valore della grandezza da misurare, che causa una variazione percettibile dell'indicazione in uscita.

Per un dispositivo con indicazione digitale, tale quantità coincide con la variazione di una unità per la cifra meno significativa (ossia la cifra più a destra nel display).

Per esempio, su un voltmetro che può visualizzare al massimo 49999 conteggi ed è predisposto sulla portata di 500 mV, la massima indicazione possibile è di 499.99 mV.

Pertanto la minima quantità che può essere visualizzata e che corrisponde al cambiamento dell'ultima cifra a destra sul display è di 0.01 mV = 10 μV.

La risoluzione sulla portata di 500 mV è pertanto di 10 μV.

In termini relativi, potremo dire che lo strumento consente di apprezzare una parte su 50000.

Questo corrisponde alla risoluzione, in termini relativi, di $2 \cdot 10^{-5}$.

Sensibilità

La sensibilità (*sensitivity*) di uno strumento è il rapporto fra una variazione dell'indicazione in uscita e la corrispondente variazione nell'ingresso. Per esempio, un milliamperometro analogico con indice su scala graduata ha la sensibilità espressa in [divisioni/mA].

Accuratezza

L'accuratezza (*accuracy*) di uno strumento stabilisce il grado di accordo del valore misurato con il vero valore del misurando e rappresenta il parametro più importante per la qualità di una misura. L'accuratezza di uno strumento viene dichiarata dal costruttore in vari modi.

Talvolta si fornisce un parametro riassuntivo di tutte le cause di errore, assegnando allo strumento la classe di precisione.

La *classe di precisione* rappresenta il valore massimo dell'incertezza (I_{\max}) che si può avere in qualunque punto della scala, espresso in percento ($c\%$) del valore di fondoscala (V_{FS}):

$$I_{\max} = \frac{c\%}{100} V_{FS} \quad (3.1)$$

Ad esempio, un voltmetro con portata di 500 V e classe di precisione $c = 0,5\%$ presenta un'incertezza massima in ogni punto della scala di $(0,5/100) \cdot 500 = 2,5$ V.

Altre volte viene fornita un'indicazione dell'incertezza strumentale con due termini (I_1 e I_2), spesso in percento: il primo ($i_1\%$) legato al valore di fondoscala (V_{FS}), il secondo ($i_2\%$) legato al valore letto (V_L).

In tal caso l'incertezza assoluta complessiva è esprimibile nel seguente modo:

$$I_{totale} = I_1 + I_2 = \frac{1}{100} (i_1\% V_{FS} + i_2\% V_L) \quad (3.2)$$

Esempio: un voltmetro impiegato sulla portata di 100 V indica 87 V.

Le sue specifiche di accuratezza sono: $0,02\% V_{FS} + 0,1\% V_L$.

L'incertezza complessiva sulla misura risulta: $(0,02 \cdot 100 + 0,1 \cdot 87)/100 = 0,107$ V.

Spesso, per gli strumenti digitali, la componente dell'incertezza I_1 legata al fondoscala viene assegnata in termini di numero di cifre o conteggi (*digit* o *count*).

In tal caso, detto x il numero di *digit* dichiarato dal costruttore per esprimere il contributo di

incertezza legato al fondoscala V_{FS} e detto N_{FS} il numero totale di conteggi che sono indicati a fondoscala, risulta:

$$I_1 = x \frac{V_{FS}}{N_{FS}} \quad i_1 \% = 100 \frac{I_1}{V_{FS}} = 100 \frac{x}{N_{FS}} \quad (3.3)$$

Per esempio, si consideri uno strumento con $3\frac{1}{2}$ cifre, e supponiamo che possa rappresentare al massimo il valore 1999.

Se questo strumento ha una componente di incertezza di 5 digit, l'incertezza, data in percento del fondoscala, sarà pari a $I_1 = 100 \cdot (5/2000) = 0,25\%$.

Reciprocamente, si consideri ora uno strumento che abbia $4\frac{1}{2}$ cifre e possa indicare al massimo il valore di 19999. Se ha un'incertezza ($i_1\%$) dello 0,02% del fondoscala, questa corrisponde in termini di digit a $x = (0,02/100) \cdot 20000 = 4$ digit.

Si deve rimarcare che i contributi di incertezza legati al fondoscala pesano con lo stesso valore assoluto in ogni punto del campo di misura, determinando errori relativi consistenti sui valori letti all'inizio della portata. Pertanto è buona norma, qualunque sia il tipo di strumento, fare le misure il più possibile verso il fondoscala.

Risoluzione e accuratezza

La risoluzione e l'accuratezza non vanno confusi. Negli strumenti digitali, con visualizzazione numerica, la risoluzione rappresenta solo il peso dell'ultima cifra, l'accuratezza rappresenta la qualità della misura. Le loro differenze si notano anche dal punto di vista numerico.

Per esempio, il multimetro digitale HP 974A presenta un'accuratezza, nelle misure di tensione:

In DC: di 0,05% $V_L + 2$ digit.

In AC (20-50 Hz): di 1% $V_L + 30$ digit.

Si osserva che la sola incertezza legata al numero di cifre (digit) è ben maggiore della risoluzione, soprattutto per le misure in corrente alternata.

Precisione

Il termine precisione (*precision*) è molto diffuso, ma non è sinonimo di accuratezza.

Per chiarire, osserviamo che misurando la medesima grandezza fisica, in successive operazioni di misura, i valori numerici ottenuti possono essere più o meno discosti fra loro.

Il fatto di ottenere valori molto vicini fra loro, per la grandezza misurata, è un indice della precisione delle misure. Con riferimento alla Fig.3.1, l'insieme delle misure del caso A) presenta dei risultati più dispersi rispetto a quelli del caso B).

Diremo che le misure del caso B) sono più precise di quelle del caso A).

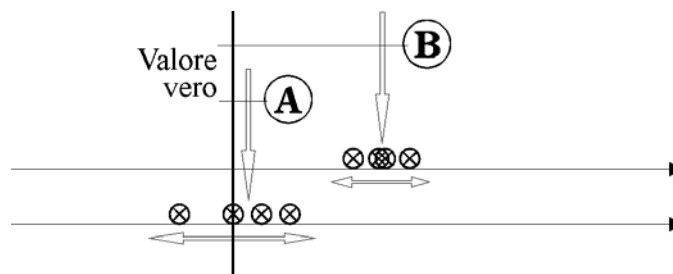


Fig.3.1 - Esempio che illustra la precisione.

Tuttavia, nel processo di misura B) si riconosce la presenza di una causa sistematica che determina un consistente errore sempre dello stesso segno (potrebbe essere un offset).

Il valore medio delle misure così ottenute nel caso B) risulta allora assai discosto dal vero valore del misurando. In tale circostanza non si ottengono risultati accurati, ossia ben approssimati al vero valore del misurando.

Il caso A), nel complesso, ha un valore medio più vicino al valore vero.

Affinchè una determinazione sperimentale sia accurata deve essere necessariamente precisa, mentre non è vero in viceversa. Con un significato vicino, ma definito meglio, rispetto a quello del termine "precisione" vengono nella pratica usati altri due termini:

Ripetibilità: è il grado di accordo ottenuto fra misure successive dello stesso misurando, effettuate nelle medesime condizioni: la stessa procedura, lo stesso osservatore, lo stesso strumento, lo stesso luogo, entro un breve lasso di tempo.

Riproducibilità: è il grado di accordo ottenuto fra misure successive dello stesso misurando, effettuato in diverse condizioni, da specificarsi: diverso metodo di misura, diverso campione di riferimento, diverse condizioni d'uso, diverso luogo e tempo, diverso operatore.

Condizioni nominali

Le condizioni nominali (*rated operating conditions*) sono le condizioni operative per le quali le caratteristiche metrologiche di uno strumento stanno entro limiti specificati. Le condizioni nominali riguardano campi o valori sia per il misurando sia per le grandezze di influenza.

Condizioni limite e di riferimento

Le condizioni limite (*limiting conditions*) sono quelle che lo strumento può sopportare senza danneggiarsi e senza che, una volta riportato nelle condizioni nominali, risultino degradate le sue caratteristiche metrologiche. Spesso vengono date condizioni limite differenti per il trasporto, per il deposito a magazzino e per le condizioni operative.

Le condizioni di riferimento (*reference conditions*) sono quelle previste durante le prove di verifica o la taratura dello strumento.