

## MISURE DI MICRORESISTENZE

L'articolo tratta del principio di funzionamento di un generico microohmmetro analizzando i vari metodi di misura, considera problemi inerenti la misura di resistenze elettriche di bassissimo valore, fino ai nanoohm, mettendo in evidenza svariati fenomeni di tipo fisico, meccanico e sistemistico che la invalidano. Viene infine considerato uno strumento reale evidenziandone le caratteristiche principali mettendole in relazione con le effettive necessità di pratico utilizzo nella produzione e ricerca.

Mentre la misura di resistenze sino alla decina di microohm di risoluzione non presenta sostanzialmente problemi, dal punto di vista prettamente tecnico sia progettuale sia d'utilizzo, diverso è il discorso quando si scende sotto questo limite poiché cominciano a non essere più trascurabili effetti esterni allo strumento quali potenziali di contatto e termoelettrici, oltre che altri di tipo meccanico, ma anche interni, come la deriva e il rumore dell'amplificatore d'ingresso.

Si passeranno a tale proposito in rassegna alcuni dei principali problemi che insorgono nella misura quando si scende a valori di resistenza veramente "infinitesimi".

Per chi non ha dimestichezza con misure di resistenze di basso valore dove servono, come si vedrà oltre, quattro terminali, si immagina comunque che la misura di una resistenza è semplice: si prende un tester, si connettono i puntali nei punti desiderati e, se la scala selezionata è corretta, si leggono gli ohm. Ma ci si è mai chiesti quante decadi copre la "resistenza"? I migliori strumenti commerciali, sia singolarmente che unitamente ad altri, permettono di misurare, considerando i valori estremi tanto in un verso che nell'altro, qualcosa come 30 decadi circa.

Si ha, ad un estremo, la misura della resistenza di isolanti grazie a tensioni di 1000V ed elettrometri da  $10^{-17}$ A di sensibilità arrivando a  $10^{20}$ ohm, per raggiungere, all'estremo opposto, i  $10^{-10}$ ohm con l'ausilio di nanovoltmetri e correnti di 10A. Senza tema di smentita la resistenza elettrica è la grandezza fisica che presenta la maggior estensione pur mantenendo una ragionevole facilità di misura. ...Di misura, non di calcolo. Nemmeno le misure di tempo, con risoluzioni di  $10^{-12}$ s attualmente direttamente misurabili, arrivano a tanto, se non altro perché nessuno è disposto ad aspettare un milione di anni per dire di aver contato  $2,5 \cdot 10^{25}$  ps, che a ben guardare è ancora piuttosto lontano da quanto visto prima.

Da quanto detto ci si accorge subito che anche senza voler arrivare per forza agli estremi, uno strumento o un metodo di misura che permetta di spaziare da valori molto grandi a molto piccoli non esiste. Essendo inoltre la

resistenza la grandezza elettrica che, dopo la tensione, è quella misurabile con maggiore precisione e ripetibilità e che con maggior facilità può essere realizzata, è naturale che su di essa si basino precisione e stabilità di molti strumenti di misura.

Volendo una precisione dello 0,01% anche con un ottimo multimetro non è possibile misurare resistenze inferiori a 1000 ohm, a meno che si adotti la compensazione dei cavi di misura: in tal modo si può guadagnare quasi un'altra decade, arrivando a risoluzioni e precisioni attorno a 0,01 ohm. Avendo la necessità di scendere ulteriormente come risoluzione, mantenendo ovviamente una adeguata precisione, diventa indispensabile utilizzare una tecnica di misura a quattro fili, chiamata anche Kelvin.

Di seguito si parlerà esclusivamente di microohmmetri (inglobando in questo termine tanto i milliohmmetro che i nanoohmmetri), ossia di quegli strumenti un po' particolari, specializzati e misconosciuti che servono proprio per la misura di resistenze comprese approssimativamente fra  $10^3$ ohm e  $10^{-9}$ ohm.

Il principio di funzionamento su cui si basano è identico per tutti: viene generata una corrente che circola tanto nella resistenza incognita che in una campione. Essendo la medesima corrente, il rapporto fra le tensioni  $V_x$  e  $V_c$  è identico al rapporto fra le resistenze  $R_x$  e  $R_c$ . Misurando le tensioni e conoscendo la resistenza campione  $R_c$  si ricava facilmente  $R_x$ .

Anche se lo schema di principio è uguale per tutti, dove i vari strumenti si differenziano è nel generatore di corrente, che può fornire correnti sinusoidali, continue, impulsive unipolari o bipolari, a seconda dei settori specifici di utilizzo, delle prestazioni e dei costi.

Ovviamente l'amplificatore di tensione d'ingresso che amplifica i segnali generalmente deboli ai capi della resistenza incognita sarà realizzato in modo diverso in funzione del tipo di corrente di misura adottata, ponendo limitazioni e vantaggi diversi da caso a caso.

Anche se non comunissime le resistenze a quattro terminali sono presenti, o come shunt o come resistenze vere e proprie, nei diffusi tester

per la misura di correnti dal centinaio di milliamperes in su, in ambito industriale per la derivazione di correnti anche di migliaia di ampere, nei microohmmetri dove fungono da resistenze campioni, e in tante altre applicazioni.

Non solo però si ha la necessità di realizzare resistenze di basso valore, anche di pochi microohm, e di precisione spesso superiore all'1%, ma capita anche sempre più frequentemente di aver bisogno di misurare la resistenza di parti meccaniche o elettriche che per loro natura, e spesso per necessità, presentano valori resistivi decisamente modesti. Basti pensare agli avvolgimenti di motori anche di solo qualche centinaio di watt dove si hanno resistenze dell'ordine della decina di milliohm, o di trasformatori di linee primarie di rete dove si possono raggiungere valori della decina di microohm e richiedere precisioni, nell'equilibratura degli avvolgimenti, migliori dell'1%.

### **Elementi induttivi**

Se elementi scarsamente induttivi non pongono problemi, questi iniziano a sorgere proprio quando si deve misurare la componente resistiva di un qualcosa che è prevalentemente induttivo. Altre problematiche ed accorgimenti necessari al fine dell'ottenimento di una buona misura saranno analizzati più avanti.

Unendo l'alta induttanza dei grossi trasformatori alla elevata precisione richiesta alla misura si ha che i tempi necessari all'assestamento della tensione entro i limiti di precisione richiesti va dalla decina di secondi a qualche minuto. Può capitare che tali tempi di attesa siano in certi casi intollerabili, ragione per cui è necessario ricorrere ad alcuni accorgimenti, quale cortocircuitare l'avvolgimento non sottoposto a misura, così da ridurre l'induttanza vista dal microohmmetro a quella di dispersione, nettamente inferiore a quella totale. Proporzionalmente si riducono i tempi.

Alte induttanze possono portare il generatore di corrente, anche ad uscita continua, dello strumento di misura ad autooscillare. Se mettendo in parallelo all'elemento sotto prova una capacità di valore tale da neutralizzare l'effetto dell'induttanza, non si ottiene quanto desiderato permanendo l'autooscillazione del sistema, il problema è da ricercarsi nel generatore di corrente che non è in grado di sopportare valori induttivi elevati. L'unica alternativa è cambiare strumento.

Un fenomeno di tipo oscillatorio lo si ha pure nel caso che si alimenti un trasformatore o un motore, e comunque un elemento

prevalentemente induttivo, con degli impulsi di corrente (unipolari o bipolari non ha importanza) che non consentono, dato la loro breve durata, un assestamento della tensione di misura. Strumenti di questo tipo, o perché non prevedono la misura con correnti continue o perché non sono in grado di fornire alte correnti per tempi sufficientemente lunghi, non sono adatti alla misura su macchine a forte componente induttiva.

### **Gli effetti di dissimmetria meccanica**

Un altro inconveniente, forse più grave, riguardante la precisione della misura è imputabile a dove e come viene iniettata la corrente di misura e prelevata la tensione, indice del valore ohmico. Su resistenze, provini o quant'altro le cui dimensioni trasversali comincino a diventare paragonabili a quelle longitudinali (per focalizzare l'idea si immagini una barra di rame piuttosto corta), diventa essenziale, per una buona precisione e ripetibilità della misura, sfruttare le simmetrie geometriche, dimensionali del pezzo sotto esame. La corrente tenta naturalmente di passare dove la resistenza è minore, e dato che generalmente il pezzo è di materiale omogeneo, per la via più breve. Questa è anche l'insieme dei punti baricentrali delle sezioni infinitesime in cui si può immaginare "affettato" il pezzo che si sta misurando. Questo è il percorso preferenziale preso dalla corrente, ossia dove si ha il massimo nel flusso di corrente. Iniettare o misurare la caduta di tensione lungo una linea diversa da questa significa far percorrere alla corrente un percorso maggiore, con la conseguenza di misurare qualcosa maggiore di quello che è. Conseguenza immediata di tale ragionamento è che la misura che da il risultato inferiore è quella che più individua la linea baricentrale.

Apparentemente può sembrare un discorso puramente teorico, ma chi realizza shunt sa benissimo che se i punti in cui viene prelevato il segnale risulta anche di poco disassato o i due capicorda che portano la corrente non sono fissati nell'identico modo (o perché non hanno la medesima superficie di contatto o/e perché sono orientati non simmetricamente), la misura risulta certamente falsata. E tali asimmetrie risultano via via più importanti quanto più è richiesta un'alta precisione.

### **L'effetto Joule**

Anche il valore della corrente risulta determinante per la misura stessa: non è vero

che raddoppiando la corrente di misura, pur lasciando perfettamente inalterata la configurazione del sistema, si ha un raddoppio della tensione misurata. La tensione è sempre leggermente superiore.

La spiegazione è semplicemente da ricercarsi nell'effetto Joule. Si è visto precedentemente che la corrente passa prevalentemente lungo la linea baricentrale, che generalmente è anche quella più interna e quindi con maggior difficoltà di dissipazione termica. Dalla classica legge  $P = I^2 \cdot R$  si ricava subito che un semplice raddoppio della corrente di misura determina un quadruplicamento della potenza dissipata, ma non solo: il riscaldamento determina a sua volta un innalzamento della resistenza e quindi un ulteriore incremento della dissipazione. Questo effetto del second'ordine è però spesso trascurabile.

A chi è capitato di vedere un report dei certificati di taratura SIT di resistenza campione avrà probabilmente notato che vengono fornite più misure con correnti diverse, proprio per il motivo sopra esposto. E leggendo attentamente si può notare che maggiore è la corrente e maggiore è il valore della resistenza misurata.

Volendo trarre una lezione bisogna considerare, per quanto possibile, di eseguire la misura alla corrente di lavoro dello shunt, del motore o del trasformatore, o alla temperatura di esercizio, per non incorrere in grossolani errori, perché se fenomeni di deriva si riescono a rilevare in resistenze campioni, c'è da immaginarsi cosa potrebbe accadere con il rame dove il coefficiente termico è notevolmente superiore alla manganina o alla costantana.

Esistono dei microohmmetri che sono in grado di eseguire misure con correnti diverse per cui sono sicuramente da preferire, anche se va considerato che gli effetti termici di tipo Joule cominciano a farsi sentire quando le correnti sono dall'ampere in su. Una misura a 1, 10 o 100 mA non dà apprezzabili differenze, a meno che si misuri, ad esempio, un NTC, ma questo difficilmente rientra nella gamma di valori coperti da microohmmetri.

### **Potenziali di contatto**

Un altro inconveniente alquanto insidioso è dovuto ai potenziali di contatto, o effetto Volta. In altre parole la classica pila, dove due metalli differenti, elettricamente in serie, generano una differenza di potenziale, dipendente a sua volta dalla temperatura. Sia la d.d.p. che l'entità della variazione sono, in valore assoluto, estremamente modesti essendo dell'ordine dei microvolt e dei decimi di

microvolt rispettivamente, ma in talune misure non sono per nulla trascurabili.

Finché lo strumento usa sensibilità, in tensione, sino a 10 microvolt difficilmente sussistono problemi, ma quando questa scende a 1 microvolt o meno diventa indispensabile tenere ben presente il fenomeno.

Tipicamente la risoluzione di 1 microohm si ottiene con 1A, per cui si ha già una risoluzione di 1 microvolt. Risoluzioni di 10 nanoohm si ottengono con correnti di 10A, ossia 100 nanovolt. In laboratorio, con varie apparecchiature connesse in sistema, si utilizzano correnti di 30, 50 o 100A, determinando però maggiori dissipazioni i cui effetti possono essere mitigati mettendo la resistenza sotto misura, se di modeste dimensioni e quindi con resistenza termica elevata, a bagno d'olio.

Quale esempio si consideri un avvolgimento da 380V di un trasformatore da 1MVA il quale presenta una resistenza tipica di 300÷350 microohm e sul quale si desidera una risoluzione di 100 nanoohm. Data la notevole massa non si ha praticamente riscaldamento per effetto Joule anche con correnti di misura di 10A, ma anche così la risoluzione in tensione si ferma a 1 microvolt. Questo significa che posizionando i terminali di tensione di un microohmmetro in punti diversi della barra ove termina l'avvolgimento si hanno spesso misure diverse per il semplice motivo che diversi sono i gradi di ossidazione del rame. La presenza di olii o del grasso acido lasciato dalle mani degli operatori contribuisce ulteriormente ad alterare la misura. Se poi si considera che i puntali possono essere tenuti in mano e quindi riscaldati a circa 30 °C prima di andare a toccare una barra a circa 20°C, si capisce come la deriva termica, soprattutto se avviene principalmente su uno dei puntali, unitamente a sensibilità che possono anche scendere a 0,1 microvolt, comporti, a livello di rappresentazione della misura, variazioni e derive anche di qualche decina di digit.

Anche qui l'insegnamento consiste nel pulire bene le superfici di contatto, in prevalenza dei terminali di tensione, attendere un tempo sufficiente affinché si abbia l'assestamento termico, non modificare i punti di misura fra una misura e l'altra e fare attenzione ad indurre riscaldamenti localizzati nei punti di contatto delle sonde di tensione.

Se questi accorgimenti sembrano esagerati ci si può consolare pensando che si è molto prossimi al limite inferiore di misura delle resistenze. Se misure sino a 10 nanoohm possono

ancora essere svolte in officina, sul campo, per scendere di una decade, a 1 nanoohm, già occorre stare in laboratorio ed adottare notevoli precauzioni. Per raggiungere i 100 picoohm non vi è altra soluzione che le camere schermate e strumenti e accorgimenti del costo complessivo di alcune centinaia di milioni di lire.

### **Disturbi esterni e interni**

Fra le cause di errore o instabilità nella misura o nell'azzeramento di origine esterna sono da considerare la presenza di campi magnetici che, inducendo del rumore elettrico possono spostare il livello in continua del segnale. Il modo migliore per attenuare questa influenza è di tenere i cavi di misura, sia di corrente che di tensione, i più corti possibile e fra loro paralleli e vicini, collegando alla massa dello strumento l'eventuale schermo dei fili di tensione.

Assicurarsi inoltre che i cavi di misura non ondegghino o vibrino anche in vicinanza di campi magnetici statici: ciò causerebbe l'insorgere di tensioni indotte di ampiezza e frequenza dipendenti dal movimento.

Fra le cause di origine interna agli strumenti prevale sicuramente la deriva dell'amplificatore d'ingresso, senza dubbio la parte più critica di un microohmmetro, che generalmente ha delle derive non superiori a 5 microvolt fra l'accensione e la stabilizzazione termica dell'apparecchio, per ridursi a  $0,5 \div 1$  microvolt nell'arco dell'ora a stabilizzazione termica avvenuta. Per la massima stabilità e ripetibilità delle misure è buona norma che queste vengano eseguite non meno di mezz'ora dopo l'accensione.

Raggiungendo la massima sensibilità dello strumento si raggiunge anche il limite del rumore dell'amplificatore, il quale determina sostanzialmente l'incertezza della misura nel brevissimo termine, cioè entro i 10 secondi. Se le fluttuazioni sono più lente, potendo eseguire delle operazioni di azzeramento, il rumore può venire assogettato a una deriva. Se ben progettato l'amplificatore non deve presentare un rumore picco-picco superiore a  $5 \div 10$  digit in un tempo non inferiore a un minuto, così da permettere l'azzeramento dello strumento.

### **Azzeramento dello strumento**

Tutti gli strumenti di una certa classe hanno la possibilità di un azzeramento automatico o quanto meno di una misura relativa che, se adeguatamente utilizzata, consente di raggiungere gli stessi risultati.

Considerato quanto detto al punto dell'articolo **Potenziali di contatto** è assolutamente da escludere di cortocircuitare i terminali di tensione, perché così verrebbero compensati i potenziali di contatto di quella particolare configurazione e non quelli della configurazione di misura. Rimane la possibilità di cortocircuitare, più intelligentemente, i terminali di corrente. In questo modo tutto ciò che viene misurato (potenziali di contatto, effetti termoelettrici e offset dell'amplificatore d'ingresso) costituisce l'offset ed è sottratto alle misure successive.

Per alcuni strumenti la funzione di azzeramento necessita di un intervento esterno che cortocircuiti un terminale di corrente sull'altro, mentre altri eseguono questa operazione internamente in modo automatico. In ogni caso il risultato è il medesimo: come sopra detto quanto misurato viene sottratto alle successive misure. Minore è il tempo impiegato per tale operazione e maggiore è quello dedicato alla misura, soprattutto se questo scarseggia come quando si è in presenza di rumore a bassa frequenza.

Esisterebbero ancora molti aspetti da considerare e approfondire come pure ci sarebbe ancora molto da dire sugli argomenti esposti sino a questo punto dell'articolo, ma la trattazione esaustiva dell'argomento richiederebbe un volume di qualche centinaio di pagine. I principi da tener presente per ottenere buone misure sono quelli semplici, spesso intuitivi, che un qualsiasi tecnico ha appreso fin sui banchi di scuola. Rileggendo attentamente l'articolo non troverete nulla che già non sia noto: si tratta solamente di "far funzionare il cervello", come si suol dire e mettere in pratica concetti acquisiti e consolidati fra le proprie conoscenze da anni.

Rimane comunque il fatto che certamente un cortocircuito è un'opinione: non è definibile univocamente perché può essere una resistenza da un miliardo di ohm per chi fa isolanti, per chi fa cavi una da un ohm, per chi fa trasformatori una da un milliohm. Lo strumento che verrà presentato successivamente permette di scendere centomila volte sotto quest'ultimo valore.

### **A cosa serve un microohmmetro?**

Il microohmmetro non è uno strumento molto conosciuto ed utilizzato, ma esistono dei settori in cui non se ne può fare a meno o in cui il suo aiuto facilita, semplifica o permette un risparmio di tempo e denaro.

Va ricordato infatti che vi sono specifiche normative che vincolano i produttori di cavi a garantire che la resistività non superi determinati valori, ma certamente questo non è l'unico utilizzo dei microohmmetri: essi possono anche essere utilizzati per:

- *resistenze di potenza per forni*
- *shunt per altissime correnti*
- *controllo della qualità della calettatura di mozzi e ruote dei treni*
- *equilibratura resistiva degli avvolgimenti trifase di trasformatori anche di notevole potenza*
- *controllo della resistenza di avvolgimento di motori e trasformatori e di eventuali cortocircuiti*
- *ecc. ecc.*

Certo, è alquanto sorprendente scoprire che il record di risoluzione, per strumenti compatti in unico case, è di  $10^{-9}$  ohm, anche se tale misura è ottenuta mediando più letture dirette da  $10^{-8}$  ohm: a questi livelli, quando si parla di cortocircuito, veramente non si sa più a cosa fare riferimento.

Per avere un'idea è sufficiente pensare che uno "spezzone di cavo" di rame di 100.000 (centomila) millimetri quadri, lungo 10 centimetri, ha una resistenza di circa  $20 \cdot 10^{-9}$  ohm, o che su un cavo da 100 millimetri quadri (già di tutto rispetto) posizionarsi per la misura con uno scarto di  $\pm 0,5$ mm significa un errore di 100 nanoohm.

Iniziamo subito col dire che è possibile benissimo utilizzare il classico, vecchio, ma pur sempre valido, sistema volt-amperometrico o i ponti di Thomson, ma l'elettronica, da qualche anno, ha permesso di realizzare ottimi strumenti con precisioni e soprattutto velocità di misura decisamente superiori. Il sistema volt-amperometrico rimane valido pressoché solamente nei laboratori metrologici dove, utilizzando strumenti estremamente specializzati quali i voltmetri e quindi precisi, si riescono ad ottenere precisioni molto spinte, a scapito ovviamente della velocità di esecuzione della misura.

Nel normale ambito produttivo, ma anche nei laboratori dei reparti di sviluppo, qualità o altro, quanto offerto dal mercato in termini di compattezza, precisione, risoluzione, costo e prestazioni è generalmente più che sufficiente. Si va infatti da strumenti palmari a tre cifre e mezzo con precisioni dello 0,5%, risoluzioni di  $1\text{m}\Omega$  e del costo di qualche centinaio di migliaia di lire, a strumenti da

200.000 punti, da laboratorio e del costo di alcune decine di milioni.

Fra questi estremi vi è tutta una serie di apparecchi taluni orientati verso il collaudo della produzione, altri verso le verifiche di laboratorio, altri ancora general purpose i quali sono generalmente funzionanti sia a rete che a batteria, anche se questa è in genere una caratteristica opzionale.

Considerata l'esiguità dei pezzi commercializzati ogni anno (si parla di non più di 50 ÷ 60 pezzi/anno in Italia considerando tutti i tipi e modelli di tutti i produttori) non c'è da stupirsi che le Case sul mercato siano poche, anzi pochissime: in ambito europeo sostanzialmente tre o quattro grandi più alcune piccole, ma tutte estremamente specializzate in questo settore della strumentazione che pur non offrendo grossi volumi di vendita rimane tecnologicamente abbastanza interessante.

In questo segmento di mercato una delle poche realtà italiane è la Pedranti Elio, un'azienda che da circa 15 anni si occupa anche di questi apparecchi detenendo circa il 35% del mercato nazionale della fascia medio-alta tramite delle società di commercializzazione e che all'ultimo INTEL ha presentato l'ultimo nato che si affianca ad altri due completando la famiglia. Le prestazioni sono sicuramente di tutto rilievo in termini di risoluzione, precisione e numero di punti di misura.

Strumenti di questo tipo sono infatti spesso utilizzati in piccole aziende, per lo più artigianali, che pur avendo la necessità di strumenti quali milliohmmetri e microohmmetri generalmente possono disporre di budget limitati: questa è la fascia più ampia di mercato che però può essere raggiunta solamente coniugando ottime prestazioni e prezzi ragionevoli. Ecco perché nel **2008**, il nanoohmetro di cui si parlerà nel seguito dell'articolo, presentato dalla Pedranti, sono state tralasciate tutte quelle opzioni o caratteristiche che non sono direttamente produttive ma comunque costano e che anche in laboratorio sono poco o per nulla utilizzate.

## **Metodi di misura**

La misura di una resistenza inizia sempre iniettando una corrente e rilevandone la caduta di tensione. Su resistenze di basso valore e quando servono risoluzioni inferiori a 0,1 ohm si adotta la tecnica di misura a quattro fili o Kelvin. In altri termini se pensiamo alla misura svolta con un normale tester si ha che consideriamo la tensione misurata sui terminali

d'ingresso dello strumento come se fosse quella presente ai capi della esistenza incognita, trascurando resistenze e potenziali di contatto, nonché la resistenza dei cavi di misura. Questo semplicemente perché l'errore che si commette è generalmente inferiore alla risoluzione dello strumento di misura.

E' possibile scendere di un ordine di grandezza sfruttando la possibilità di misure relative di multimetri più sofisticati, ma oltre diventa indispensabile un collegamento a quattro terminali: due portano la corrente di misura e due rilevano la caduta di tensione esattamente nei punti dove si desidera. In questo modo si evitano le cadute di tensione lungo i cavi di corrente e nei punti di contatto, cadute che possono essere  $4 \div 6$  ordini di grandezza superiori alla risoluzione della misura stessa. Anche con quattro fili la misura avviene sempre iniettando una corrente nella resistenza incognita, corrente che può essere alternata, impulsiva bipolare o continua.

Ciascuno di questi metodi offre dei vantaggi o nei confronti del circuito elettronico o di quanto si va a misurare, ma sicuramente essi non sono sempre intercambiabili.

#### **Alternata sinusoidale**

Viene usata una corrente alternata sinusoidale di  $1 \div 2$  Hz.

Presenta il vantaggio che l'amplificatore d'ingresso, lavorando in alternata, non ha problemi di deriva; per contro i problemi di rettificazione di un segnale a frequenza così bassa non permettono di avere generalmente precisioni migliori di 0,1%. Considerando inoltre che a 1Hz un avvolgimento, anche soltanto di  $1\mu\text{H}$ , presenta una reattanza di ben  $6,28\ \mu\text{ohm}$ , si comprende come non sia possibile scendere a risoluzioni inferiori al microohm nella misura di elementi anche di poco induttivi.

Volendo si potrebbe misurare la componente della tensione in fase con la corrente di misura, così da isolare la sola componente resistiva, ma ciò andrebbe a vanificare la semplificazione circuitale ottenuta sull'amplificatore d'ingresso.

#### **Impulsiva bipolare**

I due impulsi di corrente di opposta polarità permettono, mediante una semplice semidifferenza delle due misure, di risalire al valore di resistenza eliminando la deriva termica dello strumento.

Se gli impulsi sono sufficientemente duraturi la parte induttiva di un avvolgimento

prima o poi viene caricata e questo significa che è possibile misurare anche elementi con preponderanza induttiva. Sussiste però il fatto che maggiore è l'induttanza e più deve durare ogni impulso di misura, sino a superare il minuto per un valore di induttanza di alcune decine di Henry.

Se l'amplificatore di misura, fra un impulso e l'altro, non rimane stabile, il metodo fallisce. In altre parole, se lo strumento deve poter misurare elementi fortemente induttivi, esso deve anche presentare una stabilità sufficiente nell'arco di  $1 \div 2$  minuti; viceversa minore è la bontà dello stadio d'ingresso, minore è la tolleranza a componenti induttive. Sussiste però generalmente un inconveniente: l'amplificatore d'ingresso non sempre presenta un'identica amplificazione su segnali di opposta polarità, almeno entro errori di  $10^{-5} \div 10^{-6}$ , per cui la media rimane affetta da un errore sistematico.

Un'incertezza di misura del tutto simile alla precedente, come entità, ma esterna allo strumento è causata da una differenza di potenziale diversa a seconda del verso di circolazione della corrente nella resistenza incognita: ne risulta che la media di due misure con opposta polarità è adeguata se l'elemento sotto misura deve funzionare in alternata, mentre è consigliabile una misura a singola polarità negli altri casi, indicando il verso della corrente di misura.

Un motivo per cui viene utilizzata tale tecnica a doppio impulso, soprattutto sui fondi scala minori, è che semplicemente lo strumento non è in grado di fornire alte correnti (generalmente 10A) per più di  $1 \div 2$  secondi. Conseguenza immediata è che simili apparecchi non sono in grado di misurare la resistenza di elementi che presentano induttanza superiori all'Henry.

#### **Continua**

Con una corrente di misura continua è possibile, in via di principio, misurare avvolgimenti con induttanze di migliaia di Henry: basta attendere a sufficienza. La precisione ottenibile, come nel caso precedente, è molto alta, ma la difficoltà sta nella stabilità dell'amplificatore d'ingresso, che non deve "spostarsi" più di qualche digit in un tempo che va dal minuto a qualche decina di minuti. E' questo il metodo che garantisce le migliori prestazioni, ma è indispensabile eseguire una buona progettazione dello stadio d'ingresso. Il costo può essere maggiore che negli altri casi,

ma la contropartita è l'assenza, o quasi, di limiti alla parte induttiva di quanto si misura.

I fattori della misura impulsiva sostengono per altro la minima dissipazione di potenza sull'elemento incognito di tale metodo rispetto ad una misura continua, ma ci si accorge immediatamente che uno shunt o un avvolgimento di 100  $\mu\text{ohm}$  misurato con 10 A (il che permette risoluzioni di 0,01  $\mu\text{ohm}$  con il microohmmetro **20008**) dissipa solamente 10 mW.

Il microohmmetro **20008** utilizza il terzo metodo e l'amplificatore d'ingresso, con un CMRR di 110 dB e una linearità di 86 dB, offre una stabilità di  $\pm 450\text{nV}$  nell'arco di 15 minuti, ovvero di  $\pm 5$  digit sulla portata di 320  $\mu\text{ohm}$  o di  $\pm 1,7$  digit su quella da 3200  $\mu\text{ohm}$ .

Il metodo è indubbiamente il più difficile da realizzare, ma è anche quello che offre i maggiori vantaggi.

Per correttezza occorre precisare che altri strumenti di classe elevata adottano la tecnica sia della misura impulsiva che continua: per il target di mercato individuato in fase di progettazione del **20008** si è ritenuto che la sola misura continua fosse la migliore soluzione.

### Uno strumento all'avanguardia

La ditta Pedranti Elio che produce questo strumento, il modello **20008**, è riuscita a realizzare un prodotto tecnicamente valido soprattutto per quanto riguarda la risoluzione, a prezzi decisamente inferiori.

A livello assoluto gli strumenti di una casa tedesca concorrente sono certamente un punto di riferimento in tutti i sensi, ma questi, proprio per le loro caratteristiche molto spinte e il loro costo, sono tipici da laboratorio.

Rimane comunque il fatto che in alcuni settori produttivi è necessario scendere sino a risoluzioni di 10 nanoohm, con ottime precisioni, con la necessità prevalente di riuscire a fare queste misure in modo semplice e principalmente a costi bassi. Questo era il target per cui è stato concepito il microohmmetro **20008**, della società Pedranti.

Alcune delle caratteristiche salienti sono infatti la sua portatilità e autonomia, le dimensioni contenute e il basso costo unita all'elevatissima risoluzione di  $10^{-8}$  ohm e ai suoi 32000 punti di misura. Non è infatti semplice coniugare portatilità e risoluzioni tanto spinte: riuscire ad ottenere risoluzioni di 100nV con rumori picco-picco circa 400nV fra 0,005Hz e 0,1Hz e con correnti in gioco di 10A, con basse

dissipazioni comporta non pochi problemi da risolvere. Per portare a termine il progetto sia hardware che software sono state impiegate circa 2500 ore affrontando non pochi problemi tecnici.

Solo per dare un'idea delle difficoltà incontrate dallo staff tecnico nel progettare questo strumento basta ricordare che da un'unica tensione base di 2V (una cella al piombo di 2V 25Ah) vengono ricavate le 9 tensioni diverse necessarie al funzionamento del circuito analogico digitale, il tutto con una potenza media assorbita di 400mW, con circuito di corrente aperto e retroilluminazione del display disattivata.

Il basso consumo interno, oltre che sull'autonomia della batteria, reca indubbi benefici sulla stabilità e precisione della misura in quanto il ridotto effetto Joule porta a gradienti di temperatura modestissimi all'interno dei componenti analogici di front end del segnale.

Se le caratteristiche hardware sono fra le migliori, anche la parte software è di tutto rispetto, con la sola eccezione della possibilità di immagazzinamento ed elaborazione statistica delle misure, per precisa scelta progettuale.

In ambito produttivo infatti vari tipi di medie o di resoconti statistici, la possibilità di memorizzare centinaia o migliaia di misure rilevando massimi o minimi hanno scarsa importanza giacché questo diventano molto interessanti non quando si eseguono misure sul singolo pezzo, ma quando si considera un lotto o un periodo di produzione. Non ha molto senso sapere il minimo e il massimo di mille misure su un singolo shunt: è molto più interessante sapere la distribuzione statistica dei valori di mille shunt.

Ma per questo serve un PC che monitorizzi i valori della produzione e li analizzi. In laboratorio generalmente le necessità sono esattamente opposte: serve tenere sotto controllo l'andamento della resistenza di un qualche elemento, ma ancora una volta questo da solo non basta: occorre registrare altre grandezze quali tempo, temperatura, umidità, forze e quant'altro rendendole su supporto cartaceo o in video, in forma numerica o grafica. ...E anche qui serve un PC con eventuale programma di gestione ed elaborazione dati.

Sulla base di queste considerazioni sono state inserite nel microohmmetro quelle prestazioni veramente utili e utilizzate, lasciando a strumenti hardware e software più specializzati ed adatti altri compiti, permettendo nel contempo una maggior flessibilità, una migliore

personalizzazione e risolvendo in modo più specifico le varie necessità.

Sebbene progettato soprattutto per essere portatile, caratteristica sempre più apprezzata ultimamente anche negli strumenti di misura di un certo pregio, grazie all'alta risoluzione di 10 nanoohm e ai suoi 32000 punti di misura è certamente da considerarsi anche uno strumento da laboratorio. Con la seriale optoisolata di cui dispone di serie può inviare i dati ad un PC con velocità sino a 19200 baud: ciò è certamente utile tanto in un laboratorio quanto in produzione per eseguire successive analisi statistiche.

Allo strumento non poteva certo mancare il classico test GO/NO GO, con le impostazioni delle soglie da menù, il beep di segnalazione e una coppia di contatti di segnalazione esterna, così pure la compensazione della temperatura (anche con la sonda data in dotazione), ovvero della possibilità di calcolare matematicamente il valore che avrebbe la resistenza sotto misura se fosse ad una temperatura diversa da quella a cui viene misurata, esprimendola come resistenza o resistività.

Lo strumento ha in memoria i coefficienti termici di 5 diversi materiali, ma può anche essere impostato un valore a piacere sino a  $255 \cdot 10^{-4}$ .

Vi è anche la misura relativa con il riferimento impostabile sia da menù che da un valore letto. In entrambe i casi si può scegliere di rappresentare lo scostamento in valore percentuale o assoluto, con la risoluzione di ben lo 0,01% nel primo caso e pari alla risoluzione della misura nel secondo.

Sul grande display, in modalità di misura, appare sempre la misura reale eseguita, oltre alle indicazioni sulle principali impostazioni dello strumento, ma può anche venir rappresentata una seconda grandezza fra quelle riportate:

- risultato del test GO/NO GO con "**no pass** ↓", "> **PASS** <" e "**NO PASS** ↑"
- valore compensato dalla temperatura, della resistività, della resistenza e della resistenza espressa come ohm/metro e ohm/kilometro
- scostamento relativo assoluto
- scostamento relativo percentuale
- misura della temperatura della sonda

Ciò consente di non perdere mai d'occhio il valore effettivo di quanto si sta misurando e nel contempo sapere anche quanto vale l'altra grandezza. Questa non è solamente una comodità o una bizzarria, ma una precisa

richiesta sorta dall'esperienza e soprattutto dagli utilizzatori.

Pensato anche per prove di avvolgimenti quali motori, trasformatori e induttanze, la lettura risulta estremamente stabile anche con carichi sino e oltre i 35 Henry, senza condensatori di compensazione. Indubbiamente un valore alto che per altro non rallenta minimamente la velocità di misura dell'apparecchio ne la fa oscillare, come invece è riscontrabile in altri casi.

Questo apre le possibilità di utilizzo non solo su trasformatori o motori di piccole/medie dimensioni, ma anche su quelli con potenze di alcuni megavoltampere, dove è sempre stato un problema la misura della componente resistiva, se non utilizzando dei kit di compensazione, laddove erano previsti, con costi generalmente sproporzionati.

Il menù è facilmente gestibile nonostante i soli cinque tasti con cui viene diretto e selezionato e con i quali è possibile impostare o modificare i valori di alcuni parametri: non esistono scomode combinazioni di tasti (difficili da ricordare) da premere per selezionare le varie opzioni, ma tutto è selezionabile in modo lineare e veloce con alcuni tasti funzione dedicati o tramite il menù. Quest'ultimo è di tipo circolare, così che le voci più significative sono "attorno" al punto d'ingresso dello stesso, permettendone un veloce accesso.

Esso contempla tutte le funzioni principali per uno strumento di questa classe e sicuramente è in grado, assieme alle funzioni con accesso diretto tramite i tasti specifici, di soddisfare tutte quelle necessità che normalmente si trovano sia in ambito produttivo che di ricerca. Non poteva mancare la possibilità, per uno strumento anche portatile, di controllare da menù la carica residua della batteria, espressa in valore percentuale, e con segnalazioni a vari livelli in modalità di misura. Una particolarità che presenta l'apparecchio è che il menù e gli avvisi sono dati nella lingua selezionata fra quattro disponibili: italiano, francese, inglese e tedesco.

Nell'esauriente manuale sono spiegate in dettaglio le funzioni dei tasti, degli ingressi e delle uscite, nonché le varie voci che compongono il menù e l'impostazione e la selezione dei parametri di funzionamento.

Ben 19 pagine del manuale sono anche riservate alla gestione del collegamento seriale, ovvero all'impostazione via software dello strumento e alla lettura dei dati, con un programma esemplificativo, ma perfettamente



funzionante e con chiare spiegazioni, col quale è possibile avere sott'occhio la configurazione dello strumento, impostare portate, effettuare l'azzeramento e leggere le misure. Di tale programma, denominato 20008.BAS e scritto in BASIC, viene fornito il listato sia sul manuale che su dischetto e la versione compilata come file EXE.

### **CARATTERISTICHE TECNICHE PRINCIPALI**

Di seguito vengono fornite alcune delle caratteristiche tecniche principali che caratterizzano il microohmmetro mod. **20008**.

Portate	320µohm ÷ 320ohm
Risoluzione	0,01µohm ÷ 0,01ohm
Numero di punti di misura	32000
Precisione base	±(0,03% + 2 digit)
Rumore in digit	5 ÷ 0,15 dgt picco-picco (a seconda della portata selezionata)
Alimentazione	di serie sia a rete che a batteria
Tipo display	LCD retroilluminato 2x16 caratteri da 4,84x9,66mm
Misura relativa (valore impostato da menu oppure da misura eseguita)	assoluta e percentuale con 0,01% di risoluzione
Compensazione della temperatura	si (rame, argento, alluminio, ferro, nichel e impostabile a piacere fra 0 e 255*10E-4)
Intervallo di compensazione	32 ÷ 255 °F / 0 ÷ 123 °C
Unita' di misura temperatura	Celsius o Fahrenheit
Misura di carichi induttivi	si, sino a 35H
Go / No go	si
Autorange	si
Autoazzeramento	si
Setup memorizzabili	2
Seriale	si, optoisolata (300 ÷ 19200 baud)
Autonomia batteria	da 150 ore a 1 ora 30 minuti (a seconda della portata selezionata)
Potenza assorbita dalla batteria	400mW (con circuito amperometrico aperto e retroilluminazione disattivata)
Lingue del menu e degli avvisi	italiano, inglese, francese e tedesco
Peso	6600 grammi circa
Dimensioni	243 x 133 x 357 mm (l x h x p)

## MENU

Di seguito viene data l'intera struttura ad albero del menù, che è totalmente circolare in tutti i suoi livelli, ovvero all'ultima/prima voce del particolare livello segue immediatamente la prima/ultima.

<b>Go / No go</b>	○	<b>G</b>	Min Max	<i>impostazione</i> <i>impostazione</i>	(0 ÷ 31999) (0 ÷ 31999)
<b>Temperatura</b>	○	<b>T/ Ω</b>	Temperatura ambiente Temperatura finale Materiale	<i>impostazione</i> <i>impostazione</i> Alfa Rame Argento Ferro Alluminio Nichel	(32 ÷ 255 °F / 0 ÷ 123 °C) (32 ÷ 255 °F / 0 ÷ 123 °C) (α) <i>impostazione</i> (0 ÷ 255) <b>(Cu)</b> <b>(Ag)</b> <b>(Fe)</b> <b>(Al)</b> <b>(Ni)</b>
			Unita misura	Celsius Fahrenheit	(°C) (°F)
			Ra Rappresentazione	valore "resistenza alla temperatura ambiente" Resistenza Temperatura	(Ω) (°C/°F)
			Sonda	Temperatura sonda	(s)
				Compensazione	Temper. amb. (Ta) Temper. finale (Tf)
<b>Misura Impulsiva</b>	○	<b>I/i</b>			
<b>Setup</b>		<b>0/1</b>	Salva setup1 Chiama setup0 Chiama setup1		(0) (1)
<b>Buzzer</b>	○				
<b>Batteria</b>			Livello Batteria		visualizzazione stato percentuale di carica
<b>Media</b>			1 2 4 8 16 32		(1) (2) (4) (8) (16) (32)
<b>Lingua</b>			Italiano Inglese Francese Tedesco		(I) (UK) (F) (D)
<b>Seriale</b>	○	<b>S</b>	Baud rate	300 600 1200 2400 4800 9600 19200	(300) (600) (1200) (2400) (4800) (9600) (19200)
			Parità	Nessuna Pari	(n) (P)
			Indirizzo Eco indirizzo	<i>impostazione</i>	(0 ÷ 50)
<b>Alta Corrente</b>	○	<b>C</b>			
<b>Start esterno</b>	○	<b>E</b>			
<b>Relativo</b>	○	<b>R</b>	Valore Rappresentazione	<i>impostazione</i> Assoluta Percentuale	(0 ÷ 31999) <b>(A)</b> (%)
<b>Resistività</b>	○	<b>m/K/p</b>	Lunghezza Sezione	<i>impostazione</i> <i>impostazione diam.</i> <i>impostazione area</i>	(100 ÷ 65250) (100 ÷ 9100) (100 ÷ 65250)
			mm mm2	Diametro Area	(ϕ) (Π)
			Calcolo	Ω/m Ω/Km ρ=R*S/l	(m) (K) (ρ)

ATTENZIONE:

- Il simbolo ● sta ad indicare la possibilità di abilitazione/disabilitazione dell'opzione di menù.

- La voce **Misura impulsiva** abilita/disabilita la funzione di misura impulsiva unipolare, solo per correnti di misura di 10A, qualora si desidera massimizzare l'autonomia della batteria.