

Prestazioni del ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900)

Scheda tecnica WIKA IN 00.31

Il ponte resistivo campione primario modello CTR9000 è stato espressamente progettato per la misura di termoresistenze in modo da offrire la miglior accuratezza possibile. I lavori sulla convalida delle prestazioni sono durati 1 anno e mezzo. Durante questo lasso di tempo sono stati eseguiti numerosi test. Questo rapporto fornisce nel dettaglio i risultati di alcuni dei test principali eseguiti per stabilire gli aspetti più rilevanti della prestazione del modello CTR9000 (F900).

I lavori sono stati eseguiti nel reparto di ricerca e sviluppo, un ambiente privo di aria condizionata, dove quindi la temperatura ambiente può variare tra i 16 °C e i 30 °C. Un ambiente non ideale per la misura elettrica di precisione. Ne deriva che, se utilizzato in laboratori a temperatura controllata e ammesso che la misurazione venga effettuata nel modo corretto, il CTR9000 (F900) possa non soltanto eguagliare i livelli di prestazione indicati in questi test, ma perfino superarli.



Ponte resistivo campione primario modello CTR9000, versione con accuratezza 20 ppb

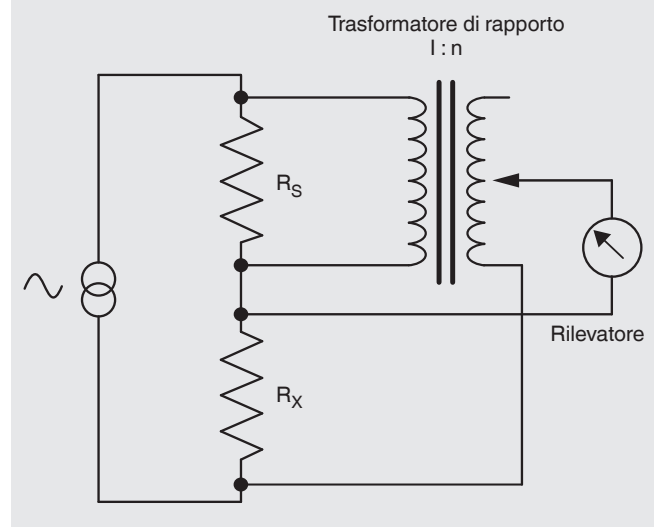
Accuratezza

Un parametro chiave delle prestazioni per il ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) è la sua accuratezza, dato che questa riduce l'incertezza di misura che può essere ottenuta utilizzando questo ponte. E' difficile poter confermare l'alto livello di accuratezza di ± 20 ppb indicato nelle specifiche tecniche. Questo per via dell'incertezza dei test utilizzati e della difficoltà di trovare della strumentazione idonea da usare in questi test. Per validare l'accuratezza, sono stati messi in pratica i seguenti metodi:

Verifica di coerenza interna

Il ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) utilizza un trasformatore di rapporto per effettuare le misure (figura 1):

Fig. 1: Concetto di misura



Le due resistenze R_S e R_X supportano la stessa corrente. Il trasformatore di rapporto è utilizzato per bilanciare la tensione sviluppata su una resistenza sconosciuta (R_X) rispetto a quella sviluppata su una resistenza standard conosciuta (R_S). Visto che il rapporto di tensione tra l'avvolgimento primario e quello secondario in un trasformatore ideale corrisponde al rapporto spire (n), ne deriva che il rapporto tra le resistenze R_X e R_S sia uguale al rapporto spire:

$$R_X = n \cdot R_S \text{ (in bilanciamento)}$$

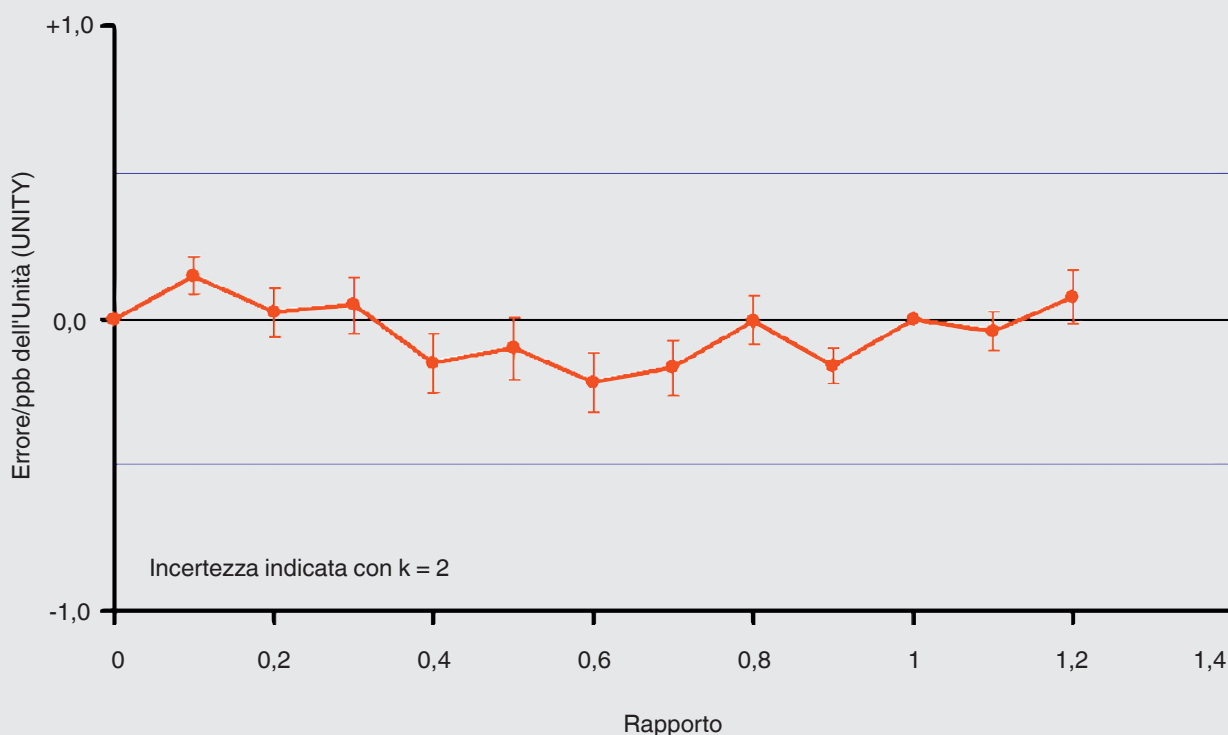
Il trasformatore di rapporto costituisce in realtà una serie di trasformatori in cascata. Ogni trasformatore ha prese a intervalli decimali (10:1, 10:2, 10:3 ... 10:9), fornendo al ponte una risoluzione pari a una decade. Visto che l'avvolgimento secondario comprende una serie di avvolgimenti individuali, è possibile connettere questi avvolgimenti "back-to-back" e utilizzare direttamente un rilevatore molto sensibile per misurare la differenza tra di loro. Queste permettono di calcolare gli errori di linearità che si verificherebbero se i segmenti degli avvolgimenti venissero integrati nell'avvolgimento secondario completo.

Tuttavia, attraverso questo metodo, gli avvolgimenti non sono sottoposti alle tensioni comuni a cui saranno sottoposti nella pratica. Questo è importante, in quanto le complesse relazioni di capacità tra gli avvolgimenti inietteranno corrente secondo le tensioni comuni. Il metodo utilizzato è stato quindi quello di collegare tutti i segmenti dell'avvolgimento secondario nella loro disposizione prevista e di confrontarli con un avvolgimento di riferimento.

Il trasformatore di rapporto ha due avvolgimenti "extra" che normalmente dirigono le decadi successive e uno di questi è stata utilizzato come riferimento nella misurazione.

La "decade" più significativa fornisce un rapporto fino a 1,2 per garantire il campo richiesto per il ponte. Questa decade stabilisce la linearità di misurazione, visto che in questo caso si trova nel punto in cui i segnali sono maggiori e quindi dove gli errori di rapporto hanno il massimo impatto sulla misura. Il confronto tra gli avvolgimenti è stato eseguito su questa decade per confermare la linearità di misura del ponte resistivo. I risultati (con le incertezze di misura) sono riportati in figura 2.

Fig. 2: Non linearità causata da errori del trasformatore di rapporto



Questo test conferma che la non-linearità causata dagli errori di rapporto nel trasformatore è minore di 1 ppb, una cifra insignificante rispetto alla prestazione di 20 ppb.

Questo test serve esclusivamente per misurare la linearità; non verifica se gli avvolgimenti forniscono in modo accurato un rapporto di unità. Tutti gli errori, sia nel rapporto di misura zero sia di unità, contribuiscono all'accuratezza di misura totale ottenuta dal ponte resistivo.

Tuttavia, è necessario verificare la prestazione "unity" collegando il terminale potenziale per R_X a R_S .

È possibile, inoltre, verificare in modo semplice la prestazione "zero" collegando in cortocircuito i quattro terminali al posto di R_X . Queste funzioni di test sono integrate nel ponte e sono accessibili tramite i tasti situati sul pannello frontale. Esse permettono di effettuare una verifica delle prestazioni dello strumento in modo semplice e funzionale.

Verifica complementare

Sebbene il ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) sia dotato di una funzione di autoverifica UNITY, sarebbe opportuno verificare l'accuratezza delle misure di rapporto in caso di utilizzo effettivo delle resistenze.

Questa verifica può essere effettuata collegando due resistenze con valore simile al ponte, misurando il rapporto e successivamente scambiando le resistenze e misurando nuovamente il rapporto. I rapporti dovrebbero essere reciproci, in modo tale che il risultato del prodotto dei due rapporti sia l'unità. L'errore di misura rappresenta quindi la metà della differenza tra il prodotto dei due rapporti e l'unità.

Nei test eseguiti sono state utilizzate due resistenze Wilkins. Sebbene il coefficiente di temperatura e quello di potenza di queste resistenze sia basso, essi sono statisticamente significativi a livello di misura (ppb) sul quale stiamo lavorando. Se queste resistenze mentre vengono scambiate manualmente e viene quindi interrotta l'alimentazione, la temperatura e anche il valore di resistenza cambia in modo considerevole con successivo ripristino di lunga durata.

Durante i test è stato possibile ovviare a questo inconveniente utilizzando relé reed per scambiare gli attacchi alle resistenze in pochi millisecondi, un lasso di tempo abbastanza breve da evitare un impatto rilevante sulla resistenza.

Il coefficiente di temperatura delle resistenze (2 ppm/°C) significa che una modifica di 1 mK nella temperatura provoca un errore di 2 ppb. Le resistenze utilizzate nel test sono state quindi scelte in modo da avere coefficienti di temperatura abbinati. Inoltre, sono state utilizzate in un ambiente a temperatura costante e le misurazioni sono state effettuate velocemente per minimizzare l'effetto del coefficiente di temperatura sulla misurazione.

Il risultato delle verifiche complementari effettuate su una serie di ponti resistivi è illustrato nella tabella 1. Queste verifiche servono per confermare che l'accuratezza di rapporto del ponte a livello dell'unità rientra nelle specifiche tecniche.

Tabella 1: Errori complementari misurati

CTR9000 (F900) S/N	R1/R2	R2/R1	R1/R2 x R2/R1	Errore/ppb
7869005009	1,000037014	0,999963000	1,000000013	-6,5
7869001005	1,000035132	0,999964862	0,999999992	4
78669003007	1,000032194	0,999967804	0,999999997	1,5

Confronto con un IVD tracciabile

Sebbene i calcoli di progettazione e le misurazioni sul trasformatore di rapporto indichino che il ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) raggiunga l'accuratezza stabilita, si voleva ottenere un modo per fornire una verifica delle prestazioni dell'intero strumento che fosse riconducibile agli standard nazionali.

Per questo scopo è stato utilizzato uno strumento di misura del rapporto (RTU), ossia un divisore di tensione induttiva (IVD) di nostra progettazione, usato come campione di riferimento dell'azienda.

L'RTU fornisce rapporti in multipli interi di undici; quando viene utilizzato entro il campo da zero all'unità (unity), questa particolare impostazione di rapporto permette di eseguire tutte le cifre di ogni decade, fornendo quindi una verifica accurata delle prese del rapporto. L'RTU è stato inviato al PTB, laboratorio metrologico nazionale Tedesco per la taratura.

Le incertezze ($k = 2$) per entrambe le misurazioni sono mostrate dalle "barre di errore". È interessante notare che l'"errore" del ponte resistivo rispecchia l'"errore" di taratura individuato dal PTB.

Ciò fa pensare che gli "errori" di taratura in questo test siano il risultato di "errori" nei valori assegnati dal PTB nella loro taratura e che quindi non siano reali. Questo non significa che i valori PTB siano sbagliati, visto che i valori nominali o di progettazione dell'RTU rientrano ampiamente nelle incertezze dichiarate dal PTB.

Avendo a disposizione le incertezze sulla taratura PTB dell'RTU, non sarebbe possibile confermare l'accuratezza con il solo ausilio di questo test. Tuttavia, l'evidente rapporto di reciprocità tra i due risultati e i calcoli di progettazione per l'RTU sostengono il punto di vista secondo il quale è lecito utilizzare i rapporti RTU nominali nel test.

Se WIKA utilizza i valori di progettazione nominali per l'RTU nel test di taratura, possiamo vedere che gli errori sono minimi.

L'errore massimo ammonta, infatti, soltanto a 14 ppb e la deviazione standard è di 5 ppb.

Le verifiche di coerenza interne confermano che la linearità dei componenti chiave all'interno del sistema di misura

del ponte resistivo raggiungono il livello di accuratezza specificato di 20 ppb. Inoltre, il confronto del ponte resistivo con l'RTU indica che la linearità dello strumento completo rientra nelle specifiche tecniche.

Rumore

Sebbene non facciano parte delle specifiche tecniche formali dello strumento, le prestazioni in termini di rumore del ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) rivestono un'importanza fondamentale nel determinare l'incertezza di misura che può essere ottenuta attraverso questo strumento.

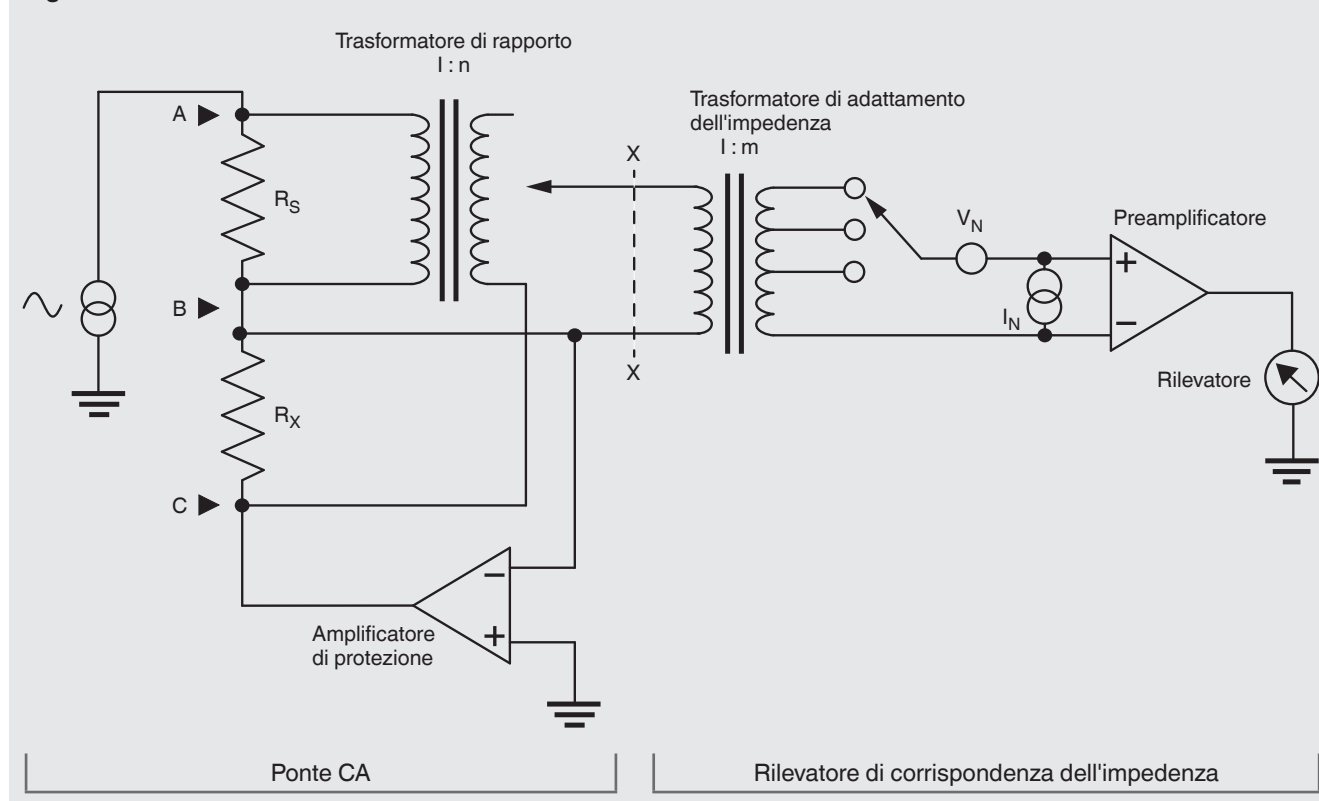
Il ponte resistivo misura il rapporto di resistenza bilanciando la tensione lungo le resistenze conosciute e sconosciute con l'ausilio di un trasformatore di rapporto. I complessi componenti elettronici circostanti il trasformatore servono per generare un effetto "bootstrap" sul trasformatore per impedire che le correnti di magnetizzazione non carichino troppo le resistenze, prevenendo in questo modo errori di misura. Questi circuiti non costituiscono una parte diretta del circuito di misura, quindi il loro contributo al rumore è limitato a quello sulle correnti minori prodotto dagli amplificatori connessi ai carichi potenziali della resistenza R_S .

Anche il rilevatore del bilanciamento di zero utilizzato contribuisce al rumore di misura. Per condizioni di rumore ottimali, l'impedenza del ponte viene fatta corrispondere all'impedenza del rumore del rilevatore con l'ausilio di un trasformatore. Per un trasformatore ideale, qualsiasi resistenza "vista" attraverso un trasformatore ha un'impedenza trasformata di 2:1.

Il rumore del rilevatore (con riferimento all'ingresso dell'amplificatore del rilevatore) può essere considerato come l'equivalente di un rumore di tensione (V_N) e di corrente (I_N), come mostrato in figura 3.

Il modo più semplice per determinare il contributo del rumore del rilevatore al rumore di misura totale è quello di rifarsi ai componenti del rumore del rilevatore nella posizione XX.

Fig. 3: Sistema di confronto del rumore utilizzato



A questo punto l'impedenza del ponte risulta in:

$$R_B = R_X + n \cdot 2 \cdot R_S$$

Nota:

In caso di misurazione di basse resistenze (SPRT ad alta temperatura o applicazioni criogeniche), le resistenze dei conduttori sono statisticamente significative ed è necessario includerle nel calcolo dell'impedenza del ponte.

Al fine di questa analisi vengono ignorate, quindi il rumore V_N in corrispondenza di X-X è dato da:

$$V_N \cdot 2 = [m \cdot I_N \cdot R_B] \cdot 2 + [V_N]^2$$

Il valore ottimale (il più basso V_N^2) per m (impostazione del trasformatore) viene determinato differenziando questa espressione con riferimento a m e impostandola a zero per ottenere:

Il rumore minimo quando:

$$V_N = m \cdot 2 \cdot R \cdot B$$

Considerando che un trasformatore ideale trasforma qualsiasi impedenza di n^2 , questo equivale ad affermare che la prestazione di rumore ottimale è ottenuta quando il trasformatore fa corrispondere l'impedenza di **rumore** del rilevatore all'impedenza del circuito di misura. Questa funzione di matching del rumore fa sì che, rispetto al normale campo di misura della resistenza utilizzato in termometria, il ponte resistivo si avvicini al limite fondamentale di rumore termico (rumore Johnson).

Per esempio:

Il rumore fondamentale Johnson su una termoresistenza standard (SPRT) di $25,5 \Omega$ a una temperatura di 0°C misurato con una larghezza di banda di $0,5 \text{ Hz}$ equivale a 893 pV e il rumore di misura ottenibile attraverso un CTR9000 (F900) configurato in modo corretto equivale a 958 pV (solamente il 7% al di sopra del limite fondamentale).

È stato creato un foglio Excel per il calcolo della cifra di rumore teorica del ponte resistivo per ogni condizione di impiego (questo può essere integrato al ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) per supportare il cliente nella previsione delle incertezze).

Si prevede che per una resistenza di 10Ω a una temperatura di 25°C , il ponte resistivo (impostato con un'impedenza di 10Ω) presenterebbe un rapporto di rumore RMS di 62 ppb a $0,7071 \text{ mA}$ e di 9 ppb a 5 mA .

Le misurazioni corrispondenti sono state effettuate utilizzando resistenze campione Wilkins in bagno d'olio a temperatura controllata, ottenendo i risultati riportati nella tabella 2.

Tabella 2: Valori di rumore calcolati e misurati

Corrente di prova	Rumore RMS calcolato	Rumore RMS misurato
0,7071 mA	62 ppb	57 ppb
5 mA	9 ppb	5 ppb

Le misurazioni confermano che la prestazione di rumore corrisponde a quella predetta con i calcoli e che si avvicina al limite di rumore fondamentale Johnson.

Accuratezza corrente del ponte

L'accuratezza della corrente del ponte riveste un'importanza fondamentale per via dell'effetto di autoriscaldamento in una termoresistenza al platino standard (SPRT). A causa di questo effetto, a una certa temperatura la resistenza della SPRT diventa dipendente alla corrente di misura al punto da essere statisticamente significativa a livello dell'incertezza obiettivo di riferimento di 20 ppb.

Di conseguenza, l'accuratezza della corrente del ponte risulta essere un fattore rilevante se la SPRT deve essere utilizzata come termometro campione di trasferimento al valore di corrente indicato o se la corrente del ponte deve essere modificata per consentire l'estrapolazione fino al valore zero di resistenza. La corrente del ponte è stata misurata utilizzando un multimetro Keithley modello 2000 per misurare la tensione sviluppata su una resistenza Wilkins tarata.

Gli errori tra la corrente misurata e quella prevista per tutte le impostazioni del ponte sono riportati nella tabella 3.

Questo test serve per confermare che la precisione della corrente è comodamente all'interno del valore specificato di $\Omega \pm 0,1 \%$.

Tabella 3: Errore di corrente del ponte

Impostazione del ponte in mA	Errore in %
50√2	0,01
50	-0,01
20√2	0,01
20	-0,01
10√2	0,02
10	0,05
5√2	-0,02
5	-0,04
2√2	-0,03
2	-0,04
√2	-0,01
1	0,02
0,5√2	0,01
0,5	-0,01
0,2√2	0,00
0,2	-0,01
0,1√2	0,02
0,1	0,05

Conclusione

Come già affermato inizialmente, i risultati dei test sopra riportati costituiscono soltanto una parte dei test effettuati sul ponte resistivo campione primario modello CTR9000 (F900) nel corso degli scorsi 18 mesi.

Tuttavia, questi test sono quelli che riguardano i criteri di prestazione più importanti per questo strumento (accuratezza, rumore e accuratezza corrente del ponte). Questi test confermano che la prestazione di questo ponte resistivo rientra ampiamente nelle relative prestazioni specificate.

Il ponte resistivo è stato progettato per rimanere il più immune possibile agli effetti ambientali (in particolare i disturbi elettrici e la temperatura). Di conseguenza, gli utenti non dovrebbero riscontrare problemi nel raggiungere il livello di prestazione specificato.

Tuttavia, è importante che gli utenti installino correttamente il ponte resistivo campione primario in modo da avere la certezza di raggiungere questa prestazione. In particolare, è necessario impostare il guadagno del ponte in modo corretto (come riportato nel manuale d'uso).

