

Performance du pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900)

Fiche technique WIKA IN 00.31

Le pont thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 est conçu spécifiquement pour les thermomètres à résistance pour fournir la meilleure incertitude de mesure de l'instrument possible. Les travaux sur la validation de la performance ont duré un an et demi. Pendant ce temps, un grand nombre d'essais a été effectué. Ce rapport fournit des détails sur certains des tests clés utilisés pour déterminer les aspects les plus critiques de la performance du CTR9000 (F900).

Le travail a été réalisé dans le département de recherche et développement, qui n'est pas climatisé, les températures ambiantes ont donc varié entre environ 16 °C et 30 °C. Cet environnement ne convient pas pour la mesure électrique de précision. Il est donc réaliste de s'attendre à ce que le CTR9000 (F900) doive être égal ou supérieur à la performance indiquée par ces tests lorsqu'il est utilisé dans la plupart des laboratoires de température, à condition que de bonnes mesures aient été effectuées.



Pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000, version 20 ppb d'incertitude de mesure de l'instrument

Précision

Un paramètre de performance clé pour le pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire de type CTR9000 (F900) est sa précision, car cela limite finalement l'incertitude d'étalonnage qui peut être atteinte en utilisant le pont.

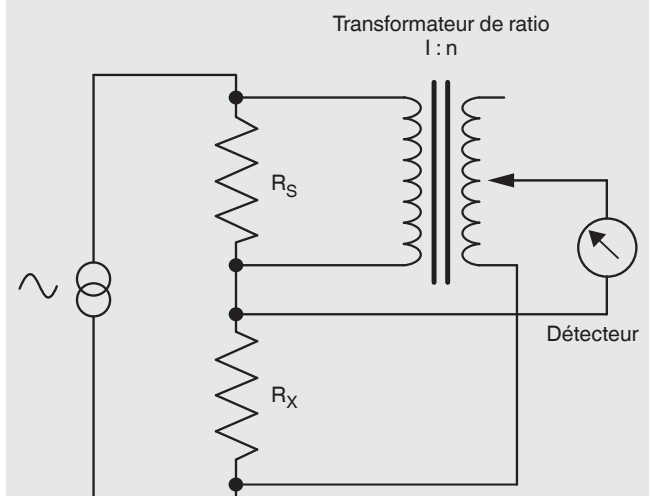
La haute précision de ± 20 ppb revendiquée dans la spécification est difficile à valider. Cela est dû à l'incertitude des tests utilisés et la difficulté de trouver des produits appropriés pour être utilisés dans de tels tests.

Les approches suivantes ont été adoptées pour valider la précision :

Contrôle de cohérence interne

Le pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) utilise un transformateur de ratio pour effectuer les mesures (figure 1) :

Figure 1 : Concept de mesure



Les deux résistances R_S et R_X conduisent le même courant. Le transformateur de ratio est utilisé pour équilibrer la tension développée à travers une résistance inconnue (R_X) contre la tension à travers une résistance étalon connue (R_S). Étant donné que le ratio de la tension à travers le primaire et le secondaire d'un transformateur idéal est égal au rapport du nombre de tours (n), le rapport des résistances R_S et R_X alors étant égal au rapport du nombre de tours :

$$R_X = n \cdot R_S \text{ (en équilibre)}$$

Le transformateur de ratio est en fait composé d'une série de transformateurs mis en cascade. Chaque transformateur a des prises en intervalles décimaux (10:1, 10:2, 10:3 ... 10:9) et fournit une décade de résolution pour le pont. Étant donné que le secondaire comprend un certain nombre d'enroulements individuels, il est possible de connecter deux de ces enroulements "dos à dos" et d'utiliser un détecteur sensible directement pour mesurer la différence entre eux. Nous pouvons donc calculer les erreurs de linéarité qui se produiraient lorsque les segments d'enroulement sont constitués dans l'enroulement secondaire complet.

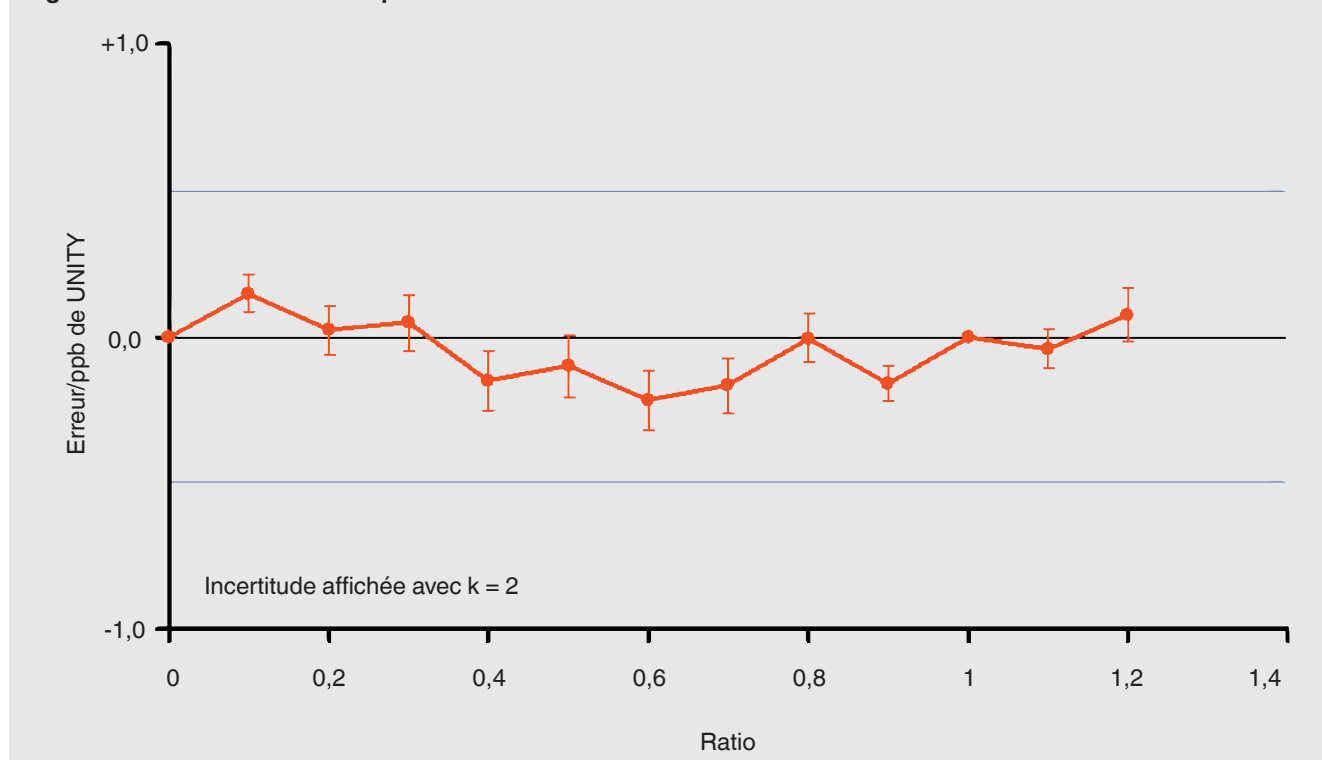
Cependant, cette approche ne soumet pas les enroulements aux tensions communes auxquelles ils sont confrontés dans la pratique. Ceci est important car les relations complexes de capacité d'inter-enroulement vont injecter un courant qui dépend de ces tensions de mode commun. L'approche utilisée était donc la connexion de tous les segments du secondaire dans leur arrangement prévu et la comparaison de ceux-ci avec un enroulement de référence.

Le transformateur de ratio a deux enroulements "supplémentaires" qui conduisent normalement les décades suivantes, et l'un de ces enroulements a été utilisé comme référence dans la mesure.

La "décade" la plus importante fournit en fait un ratio jusqu'à 1,2 pour donner l'étendue requise pour la thermométrie. Cette décade détermine effectivement la linéarité de mesure, car c'est l'endroit où les signaux sont plus grands et, par conséquent, où les erreurs de ratio ont l'impact le plus fort sur la mesure.

L'inter-comparaison d'enroulement a été faite sur cette décade afin de confirmer la linéarité de mesure du pont de mesure thermométrique à résistance. Les résultats (avec les incertitudes de mesure) sont présentés dans la figure 2.

Figure 2 : Non-linéarité causée par des erreurs de transformateur de ratio



Ce test confirme que la non-linéarité provoquée par les erreurs de ratio dans le transformateur est inférieure à 1 ppb et est donc négligeable par rapport à la performance spécifiée de 20 ppb.

Ce test mesure uniquement la linéarité ; il ne vérifie pas si l'enroulement complet fournit précisément un ratio de l'unité. Toute erreur dans les mesures de ratio du zéro ou de l'unité contribue davantage à la précision de mesure totale réalisée par le pont de mesure thermométrique à résistance.

Cependant, il est facile de vérifier la performance de "l'unité" en connectant la borne de potentiel pour R_X à R_S .

Il est également facile de vérifier la performance du "zéro" en connectant un court-circuit à quatre bornes à la place de R_X . Ces fonctions de test sont intégrées dans le pont et mises à disposition à l'aide des touches du panneau avant. Elles fournissent un contrôle de performance de l'instrument simple et utile.

Vérification complémentaire

Bien que le pont de mesure à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) soit équipé d'une fonction d'auto-test UNITY, il est nécessaire de vérifier la précision des mesures de ratio lorsqu'on utilise de réelles résistances.

On peut atteindre ce but en reliant deux résistances de valeur similaire au pont et en mesurant le ratio, et ensuite en échangeant les résistances et en mesurant le ratio une nouvelle fois. Les ratios doivent être réciproques, de sorte que le produit des deux ratios doit être l'unité. L'erreur de mesure est donc égale à la moitié de la différence entre le produit des deux ratios et de l'unité.

Deux résistances Wilkins ont été utilisées lors des essais. Bien que le coefficient de température et le coefficient de puissance de ces résistances soient faibles, ils sont significatifs au niveau de la mesure (ppb) sur laquelle nous travaillons. L'interruption du courant vers les résistances alors qu'on est en train de les échanger manuellement fait que la température et donc la valeur des résistances va varier de manière significative, ce qui sera suivi d'une durée de stabilisation relativement longue.

Cette difficulté a été surmontée dans les tests au moyen de relais reed pour échanger les connexions vers les résistances en l'espace de quelques millisecondes, un laps de temps qui est assez court pour n'avoir pas d'impact sur la résistance.

Le coefficient de température des résistances (2 ppm/°C) signifie qu'un changement de 1 mK de température donne une erreur de 2 ppb. Les résistances utilisées dans le test ont donc été choisies pour avoir correspondu aux coefficients de température, elles ont été utilisées dans un environnement de température stable et les mesures ont été effectuées rapidement afin de minimiser l'effet du coefficient de température sur la mesure.

Le résultat des vérifications complémentaires dans un certain nombre de ponts de mesure thermométrique à résistance est indiqué dans le tableau 1. Les vérifications complémentaires confirment que la précision du ratio du pont à l'unité est conforme aux spécifications.

Tableau 1 : Erreurs complémentaires mesurées

CTR9000 (F900) S/N	R1/R2	R2/R1	R1/R2 x R2/R1	Erreur/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

Comparaison avec un IVD retraçable

Bien que les calculs d'exécution et les mesures sur le transformateur de ratio indiquent que le pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) atteint la précision indiquée, il était nécessaire de trouver un moyen de fournir une vérification de performance pour l'instrument entier qui était traçable par rapport aux étalons nationaux.

A cet effet, une unité de test de ratio (RTU) a été utilisée, qui est un diviseur inductif de tension (IVD) de notre propre conception, est utilisée comme étalon de référence de l'entreprise.

La RTU fournit des ratios à des multiples entiers d'onzièmes ; ce réglage de ratio particulier est utile car il exerce tous les chiffres de chaque décade lorsqu'utilisé sur l'étendue allant de zéro à l'unité et ainsi fournit une vérification approfondie des prises de ratio. La RTU a été envoyée au PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), le laboratoire national d'étalonnage d'Allemagne.

Les incertitudes ($k = 2$) pour les deux mesures sont présentées par les "barres d'erreur". Il est intéressant de noter que "l'erreur" du pont de mesure thermométrique à résistance est une image miroir de "l'erreur" de l'étalonnage déterminée par le PTB.

Ceci suggère que les "erreurs" d'étalonnage déterminées dans ce test sont le résultat des "erreurs" dans les valeurs attribuées par le PTB dans leur étalonnage et qu'elles ne sont pas réelles. Cela ne signifie pas que les valeurs PTB sont mauvaises, car les valeurs nominales ou de conception pour la RTU sont confortables dans les incertitudes déclarées par PTB.

Avec les incertitudes disponibles sur l'étalonnage PTB de la RTU, il est impossible d'utiliser uniquement ce test pour confirmer la précision. Cependant, la relation d'image miroir frappante entre les deux résultats en combinaison avec les calculs de conception pour la RTU prouve qu'il est légitime d'utiliser les ratios nominaux RTU dans le test.

Comme WIKA utilise les valeurs nominales de conception pour la RTU dans le test d'étalonnage, nous pouvons constater que les erreurs sont très petites. L'erreur maximale est seulement de 14 ppb et l'écart type est de 5 ppb.

Les contrôles de cohérence interne confirment que la linéarité des éléments clés dans le système de mesure du

pont de mesure thermométrique à résistance atteignent facilement la précision de 20 ppb déclarée. En outre, la comparaison du pont de mesure thermométrique à résistance par rapport à la RTU indique que la linéarité de l'instrument entier est conforme à sa spécification.

Bruit

Bien qu'il ne fasse pas partie de la spécification formelle de l'instrument, le niveau de bruit du pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) est essentiel dans la détermination de l'incertitude d'étalonnage qui peut être atteinte avec cet équipement.

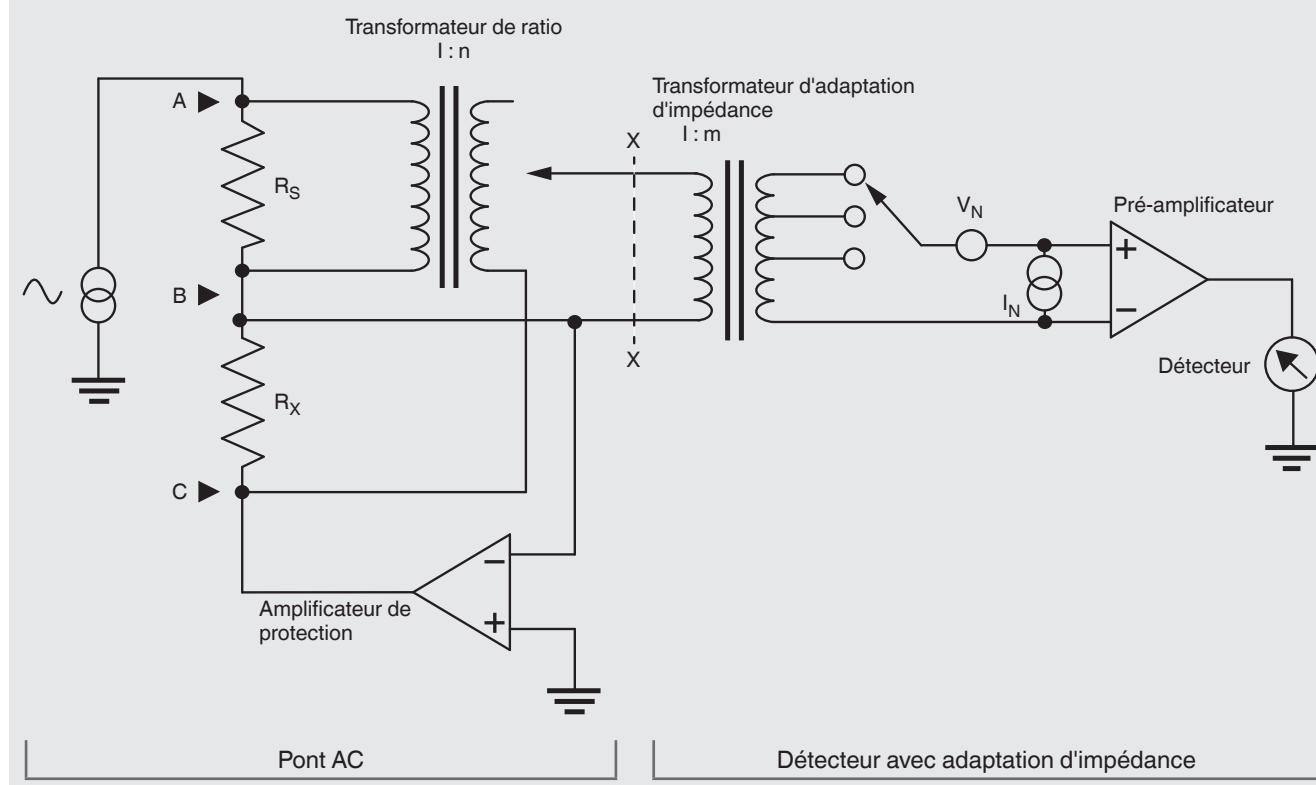
Le pont de mesure thermométrique à résistance mesure le rapport de résistance en équilibrant la tension à travers les résistances connues et inconnues au moyen d'un transformateur de ratio. L'électronique complexe qui entoure le transformateur sert à faire un "bootstrap" au transformateur de sorte que les courants magnétiques présents dans le transformateur ne chargent pas les résistances de manière significative, car ceci conduirait à des erreurs de mesure. Ces circuits ne font pas directement partie du circuit de mesure, donc leur contribution au bruit est limitée au bruit présent sur les très faibles courants de polarisation consommés par les amplificateurs qui sont reliés aux lignes de potentiel de la résistance R_S .

Le détecteur de compensation à zéro utilisé contribue également au bruit de mesure. L'impédance de pont est adaptée à l'impédance de bruit du détecteur par un transformateur pour optimiser le bruit de mesure. Pour un transformateur idéal, toute résistance "vue" à travers un transformateur a son impédance transformée dans une proportion de 2 à 1.

Le bruit du système de détecteur (référé à l'entrée d'amplificateur de détecteur) peut être considéré comme un bruit de tension (V_N) et un bruit de courant (I_N) équivalent à celui indiqué à la figure 3.

Le moyen le plus facile de déterminer la contribution du bruit de détection dans le bruit de mesure total est de référer les composants de bruit de détecteur à la position XX.

Figure 3 : Système d'adaptation de bruit utilisé



A ce point, l'impédance du pont est de :

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

Remarque :

Lors de la mesure de faibles résistances (SPRT à haute température ou applications cryogéniques), les résistances de ligne sont importantes et doivent être incluses dans le calcul de l'impédance de pont.

En vue de cette analyse, elles sont ignorées, donc le bruit V_N à X-X est donné par :

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

La valeur optimale (la plus basse V_N^2) pour m (réglage de transformateur) est déterminée en différenciant cette expression par rapport à m et en la réglant sur zéro afin de donner :

Bruit minimal lorsque :

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

Lorsqu'on prend en considération qu'un transformateur idéal transforme toute impédance par n^2 , il en résulte que la performance de bruit optimale est obtenue lorsque le transformateur adapte l'impédance de **bruit** du détecteur à l'impédance du circuit de mesure. Cette installation correspondant au bruit permet au pont de mesure thermométrique à résistance d'approcher la limite fondamentale de Bruit Johnson sur l'étendue normale de mesure de résistance utilisée dans la thermométrie.

Pour exemple :

Le Bruit Johnson fondamental sur une sonde à résistance étalon en platine (SPRT) de $25,5 \Omega$ à 0°C mesurée avec une largeur de bande de $0,5 \text{ Hz}$ est de 893 pV et le bruit de mesure réalisable avec un CTR9000 (F900) correctement configuré est équivalent à seulement 958 pV (seulement 7% au-dessus de la limite fondamentale).

Un tableau Excel a été produit qui calcule le facteur de bruit théorique pour le pont de mesure thermométrique à résistance pour toute condition de fonctionnement (ceci peut être fourni aux clients du pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire de type CTR9000 (F900) pour aider à prédire des bilans d'incertitude).

Celui-ci prédit que pour une résistance de 10Ω mesurée à 25°C , le pont de mesure thermométrique à résistance (réglé sur une impédance de 10Ω) générerait un bruit de ratio RMS de 62 ppb à $0,7071 \text{ mA}$ et de 9 ppb à 5 mA .

Les mesures correspondantes ont été effectuées à l'aide de résistances étalon Wilkins dans un bain d'huile stabilisé en température, avec les résultats indiqués dans le tableau 2.

Tableau 2 : Chiffres de bruit calculés et mesurés

Courant de test	Bruit RMS calculé	Bruit RMS mesuré
0,7071 mA	62 ppb	57 ppb
5 mA	9 ppb	5 ppb

Les mesures confirment que le niveau de bruit du pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) est comme prévu par les calculs de conception et s'approche le plus possible de la limite fondamentale de Bruit Johnson.

Précision du courant de pont

La précision du courant de pont est importante en raison de l'effet d'auto-échauffement dans une sonde à résistance étalon en platine (SPRT). Cela fait que la résistance de la SPRT à une température définie est dépendante du courant de mesure dans une proportion qui est significative au niveau d'incertitude cible de 20 ppb.

La précision du courant de pont est donc importante si la SPRT doit être utilisée comme une sonde étalon de transfert à un courant déterminé, ou si le courant de pont doit être modifié pour permettre une extrapolation en retour vers la résistance de puissance nulle. Le courant de pont a été mesuré à l'aide d'un multimètre Keithley 2000 pour mesurer la tension développée à travers une résistance Wilkins étalonnée.

Les erreurs entre le courant mesuré et le courant attendu pour tous les réglages de pont sont indiquées au tableau 3.

Ce test confirme que la précision du courant se trouve, confortablement, dans les $\Omega \pm 0,1$ % spécifiés.

Tableau 3 : Erreur de courant du pont

Réglage de courant du pont en mA	Erreur en %
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

Conclusion

Comme édicté au début, les résultats de test ci-dessus sont une sélection limitée des tests complets effectués sur le pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire type CTR9000 (F900) sur les derniers 18 mois.

Cependant, ces tests sont ceux qui mettent en question les critères de performance les plus importants pour cet instrument (précision, bruit et précision de courant de pont). Ces tests confirment que la performance de ce pont de mesure thermométrique à résistance se trouve bien dans sa spécification de performance.

Le pont de mesure thermométrique à résistance est conçu pour être aussi protégé contre les effets environnementaux que possible (en particulier le bruit électrique et la température). Il devrait donc être possible aux utilisateurs d'atteindre la performance en question.

Il est toutefois important pour les utilisateurs de mettre en place le pont de mesure thermométrique à résistance étalon primaire correctement afin de réaliser cette performance. En particulier, les utilisateurs doivent régler le gain de pont correctement (comme indiqué dans le mode d'emploi).



WIKAL Instruments s.a.r.l.

95220 Herblay

Tel. 0 820 951010 (0,15 €/mn)

Tel. +33 1 787049-46

info@wika.fr

www.wika.fr