



Isidoro KZ (IsidoroKZ)

PROGETTO TERMOSTATO IV - NTC: ERRORI DEI MODELLI E TOLLERANZE

11 November 2011

Introduzione

In questo quarto, ma non ultimo, articolo della serie verranno esaminati gli effetti delle approssimazioni dei **modelli** e delle tolleranze delle NTC sulla misura della temperatura. Si userà il modello di **Steinart** e **Hart** [3] (abbreviato **SH**) come valore di riferimento, e rispetto a questo si confronteranno il modello **esponenziale** [1][2], quello di **Fraden** [4] e di **Bosson, Gutmann** e **Simmons** [5] (abbreviato **BGS**).

La scelta del modello di SH come riferimento, vale a dire come modello che fornisce "i valori giusti" e' giustificato dal fatto che le relazioni di SH hanno un errore complessivo di pochi millikelvin. Tutti gli altri modelli sono molto piu' imprecisi, e l'errore di SH puo' essere trascurato quando si valutano gli altri modelli.

Sara' poi calcolato l'effetto delle tolleranze dell'NTC nella misura della temperatura con il modello esponenziale: oltre al valore resistivo, anche il coefficiente B e' affetto da tolleranze.

DISCLAIMER: Questo e' un articolo eminentemente metodologico, viene usata abbastanza matematica!. Non ci sono direttamente circuiti pratici, ma solo i conti necessari per valutare le prestazioni di un componente.

Nel prossimo, sperabilmente ultimo, articolo della serie sara' analizzato il problema della linearizzazione delle NTC.

Errori dei modelli

In questa parte saranno esaminati gli errori dei modelli esponenziale, di Fraden e BGS. Come componente di riferimento si utilizzerà la solita NTC da 10 kΩ già usata in precedenza [1][2], con i coefficienti del modello SH forniti dal costruttore, coefficienti che si suppone forniscano l'effettivo comportamento del componente, con un livello di precisione molto maggiore degli altri modelli.

Si assumerà quindi che la resistenza dell'NTC sia data esattamente dalla relazione di SH.

$$(1) \quad R(T) = R_{25^{\circ}\text{C}} e^{(A+B/T+C/T^2+D/T^3)}$$

con i coefficienti A B C e D dati dal costruttore sul datasheet [1], materiale numero 9,

PARAMETER FOR DETERMINING NOMINAL RESISTANCE VALUES											
NUMBER	B _{25/85} (K)	NAME	TOL. B (%)	A	B (K)	C (K ²)	D (K ³)	A ₁	B ₁ (K ⁻¹)	C ₁ (K ⁻²)	D ₁ (K ⁻³)
8	3740	Mat B. with Bn=3740K	2	-13.8973	4557.725	-98275	-7.522357E+06	3.354016E-03	2.744032E-04	3.666944E-06	1.375492E-07
9	3977	Mat A. with Bn=3977K	0.75	-14.6337	4791.842	-115334	-3.730535E+06	3.354016E-03	2.569850E-04	2.620131E-06	6.383091E-08
10	4090	Mat C. with Bn=4090K	1.5	-15.5322	5229.973	-160451	-5.414091E+06	3.354016E-03	2.519107E-04	3.510939E-06	1.105179E-07

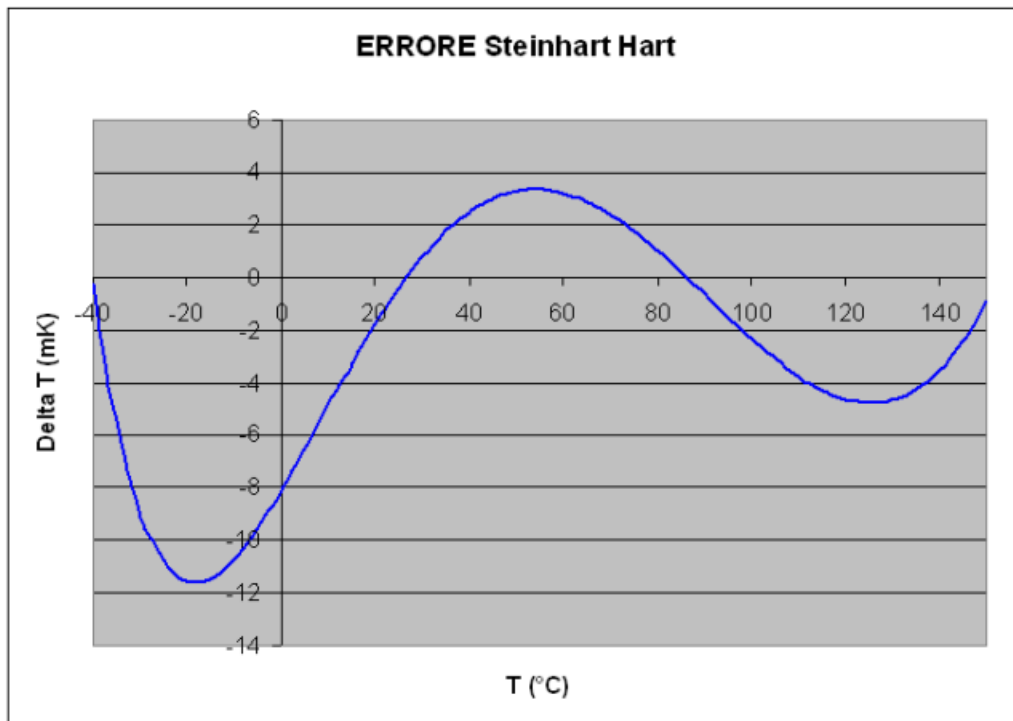
NTCTAB3.png

e il valore nominale dell'NTC di 10 kΩ. Data la resistenza $R(T)$ misurata ad una determinata temperatura T , e' possibile calcolare la temperatura invertendo l'equazione (1). Benche' esista la soluzione analitica delle equazioni di terzo grado, e' piu' conveniente usare una approssimazione per trovare la temperatura data la resistenza. L'approssimazione fornita dal costruttore, insieme con i coefficienti A_1 , B_1 , C_1 , D_1 , e' la seguente:

$$(2) \quad T(R) = \frac{1}{A_1 + B_1 \ln \left(\frac{R(T)}{R_{T_0}} \right) + C_1 \ln^2 \left(\frac{R(T)}{R_{T_0}} \right) + D_1 \ln^3 \left(\frac{R(T)}{R_{T_0}} \right)}$$

Applicando in sequenza ad un valore di temperatura la (1), che fornisce la resistenza "esatta" a quella temperatura, e successivamente la (2), si dovrebbe ritrovare la temperatura iniziale.

Poiche' pero' la (2) e' solo una approssimazione, si trovera' una temperatura letta affetta da un certo errore. Il calcolo dell'errore nell'intervallo da -40°C fino a 150°C e' stato fatto con EXCEL e il risultato e' nella seguente figura:



NTC SH.PNG

L'errore della stima della temperatura, anche su un intervallo molto grande, rimane limitato a pochi millikelvin, mostrando che l'approssimazione fornita dalla Vishay è decisamente molto buona.

L'errore potrebbe ancora essere ridotto calibrando il modello sull'NTC, calcolando cioè i coefficienti della (2) in base a misure effettive, ma quando si va sui millikelvin è necessario avere a disposizione un laboratorio metrologico di termometria.

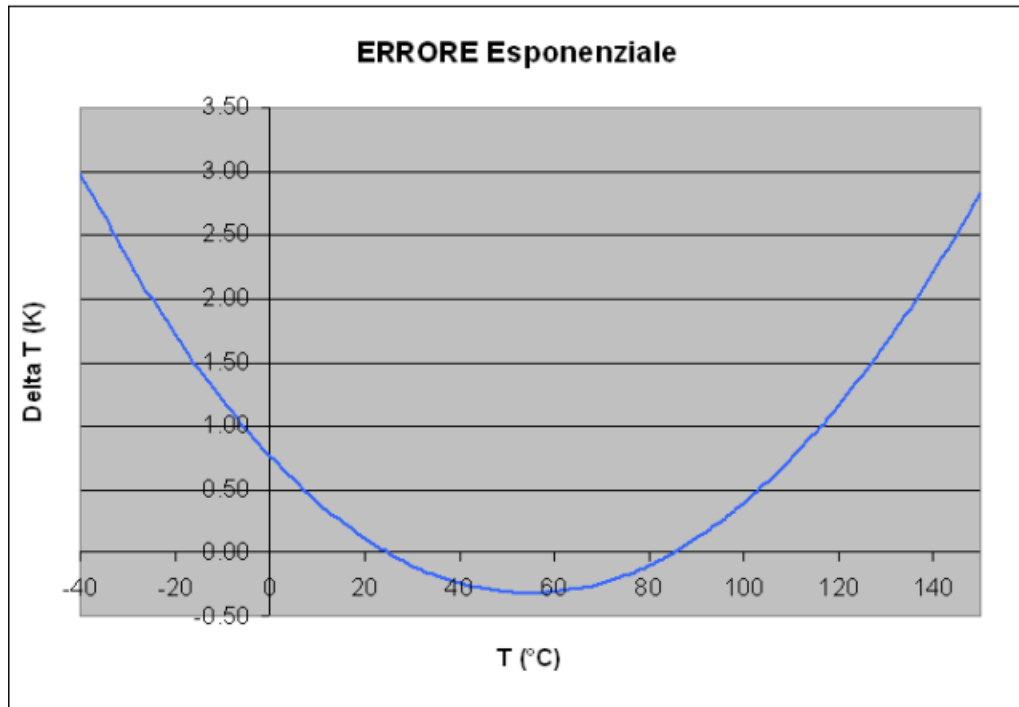
Approssimazione Esponenziale

Per valutare la bontà dell'approssimazione esponenziale si genera con l'equazione (1) il valore di resistenza corrispondente a una data temperatura e si ricalcola la temperatura fornita dal modello esponenziale, per mezzo dell'equazione (3).

$$(3) \quad T = \frac{B}{\ln \left(\frac{R(T)}{R_{25^{\circ}\text{C}}} \right) + \frac{B}{298.15 \text{ K}}} - 273.15 \text{ K}$$

Sembra quasi un lavoro inutile, ma la differenza è che il passaggio da temperatura a resistenza è preciso, e considerato senza errori, mentre il passaggio a rovescio con il modello esponenziale, presenta degli errori di modello.

L'errore nell'intervallo da -40°C a 150°C , calcolato come differenza fra il valore ottenuto dal modello esponenziale utilizzando i valori nominali indicati dal costruttore meno il valore di temperatura iniziale usato in SH è mostrato nella seguente figura:



NTC EXP.PNG

L'errore è abbastanza elevato: rimane entro ± 0.5 K nell'intervallo fra 10°C fino a 100°C . Un errore del genere è tollerabile per termometri domestici di bassa qualità, mentre comincia ad essere troppo elevato per termostati industriali, e inaccettabile in molti casi di utilizzo professionale.

Bisogna ancora ricordare che questo è solo l'errore del modello, al quale si deve ancora aggiungere l'effetto delle tolleranze del componente ed eventualmente gli errori di lettura della resistenza. Anche nel caso di circuiti di linearizzazione, l'errore del modello rimane.

Su intervalli di temperatura limitati, ad esempio nel caso di un termostato domestico da 5°C a 40°C , è possibile ridurre l'errore definendo un valore di B e di R_{T_0} equivalenti calcolati per lo specifico campo di temperatura.

Prendendo due coppie di valori temperatura/resistenza vicini agli estremi dell'intervallo che si vuole misurare, 15% e 85% dell'intervallo vale a dire 10°C e 35°C , è possibile con un semplice calcolo ridefinire i valori equivalenti R_{T_0} e B che minimizzano l'errore.

La scelta di 15% e 85% deriva dalla forma dell'errore, simile a una parabola: con questi punti l'errore si distribuisce all'incirca in modo simmetrico rispetto all'errore nullo.

I valori "esatti" di resistenza alle due temperature di questo esempio, calcolati con il modello SH sono dati in questa tabella:

TABELLA 1

Temperatura (°C) Temperatura (K) Resistenza (Ω)

10	283.15	19873
35	308.15	6534.8

Con i valori indicati, usando l'equazione del modello esponenziale che fa uso del parametro della resistenza a temperatura infinita $R(T) = R_{\infty} e^{(B/T)}$ si ha

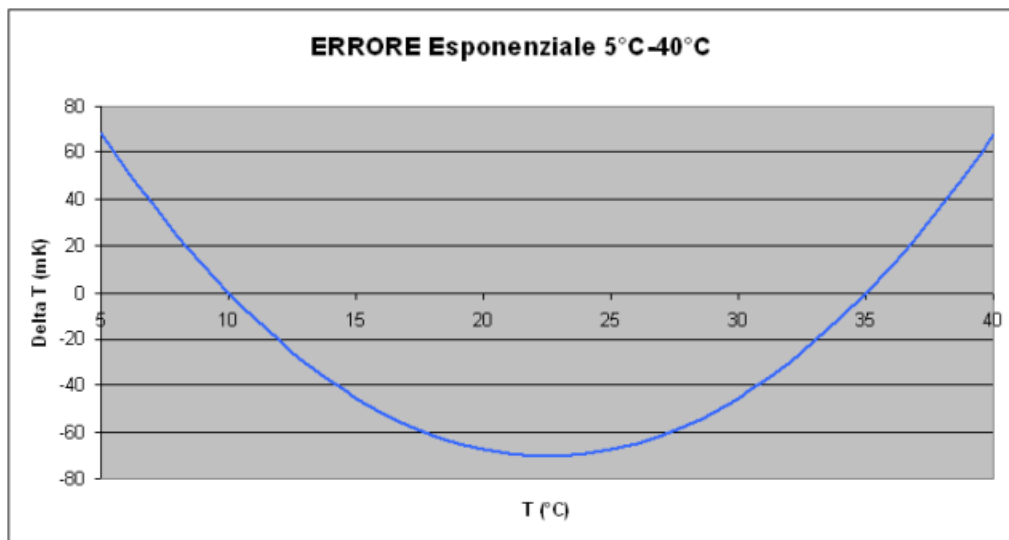
$$(4) \begin{cases} 129289\Omega = R_{\infty} \cdot e^{B/283.15K} \\ 1480.94\Omega = R_{\infty} \cdot e^{B/308.15K} \end{cases}$$

Risolvendo le due equazioni (4) si ottiene $R_{\infty} = 22.1 \text{ m}\Omega$ e $B = 3881.7 \text{ K}$

Si può "denormalizzare" il valore di R_{∞} trasformandolo in una coppia R_{T_0} e T_0 . Dovendo ricavare due valori da un solo dato, si ha un grado di libertà: si può scegliere a piacere uno dei due parametri e si trova l'altro.

Assumendo come temperatura di riferimento il valore di 25°C si trova come valore equivalente $R_{25^\circ\text{C}} = 9970.6 \Omega$ con lo stesso valore di $B = 3881.7 \text{ K}$ indicato prima. Da notare che l'NTC è sempre il solito, ma in questo caso viene modellato su un diverso intervallo di temperatura.

L'errore che risulta, al solito calcolando la resistenza con la (1) e poi ricalcolando la temperatura con la (3) e i nuovi parametri ricalcolati, è mostrato in figura:



NTC EXP Rid.PNG

L'errore massimo è di $\pm 70 \text{ mK}$ più che adeguato per un termostato. La creazione di un modello di questo genere, calibrato su un intervallo ridotto, costa la misura della resistenza a due diversi

valori di temperatura che devono essere più precisi dell'errore del modello. Questa procedura di calibrazione permette di eliminare gli effetti delle tolleranze del componente.

Modello di Fraden

Il modello di Fraden [4][6], già introdotto in [1], considera il coefficiente B non una costante, come nel modello esponenziale, ma variabile linearmente con la temperatura. L'equazione della resistenza in funzione della temperatura è quindi

$$(5) \quad R(T) = R_{T_0} e^{B_{T_0} (1 + \gamma(T - T_0)) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Questo è un modello con due parametri liberi, B e γ , oltre alla temperatura di riferimento T_0 e relativa resistenza R_{T_0} . Ci si aspetta quindi che questo modello possa avere errori minori rispetto al modello esponenziale.

La determinazione dei parametri liberi viene effettuata imponendo il valore di resistenza e di temperatura in due punti, ad esempio -25°C e $+75^\circ\text{C}$, punti che sono simmetrici rispetto alla temperatura $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Queste due temperature saranno usate sia in questo modello che nel successivo: la resistenza corrispondente alle due temperature, calcolata con il modello SH vale:

TABELLA 2

Temperatura ($^\circ\text{C}$) Temperatura (K) Resistenza (Ω)

-25	248.15	129289
25	298.15	10000
75	348.15	1480.94

I due valori estremi vengono messi nella relazione di Fraden, ottenendo:

$$(6) \quad \begin{cases} 129289\Omega = 10000\Omega \cdot e^{B_{T_0} (1 + \gamma((248.15 - 298.15)\text{K}) \left(\frac{1}{248.15\text{K}} - \frac{1}{298.15\text{K}} \right))} \\ 1480.94\Omega = 10000\Omega \cdot e^{B_{T_0} (1 + \gamma((348.15 - 298.15)\text{K}) \left(\frac{1}{348.15\text{K}} - \frac{1}{298.15\text{K}} \right))} \end{cases}$$

Risolvendo questo sistema di equazioni si trovano il valore di $\gamma = 0.000458\text{K}^{-1}$ e di $B_{T_0} = 3876\text{K}$. Da osservare che il valore di γ è sensibilmente diverso e più piccolo di quanto indicato da Fraden in [5] e riportato in [1]. La ragione potrebbe essere dipendere dalla diversa tecnologia e forse anche dall'estensione dell'intervallo di temperatura che in [5] è di soli 70 K.

Provando a invertire l'equazione (5) si dovrebbe ottenere la relazione fra resistenza misurata e temperatura. Un primo risultato che si trova immediatamente è

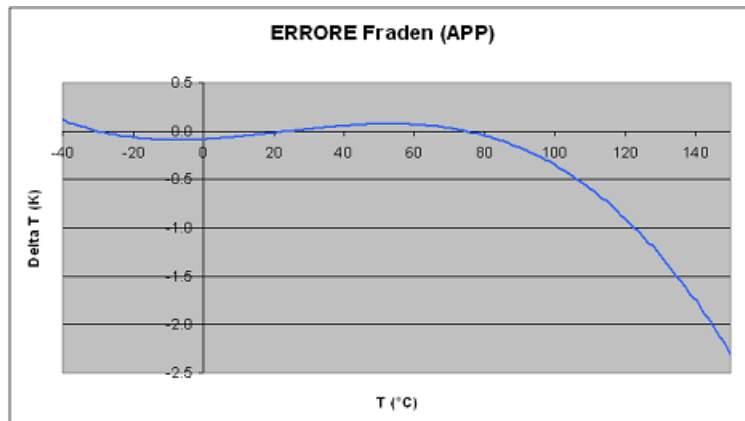
$$(7) \quad T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln \frac{R}{R_0}}{B_{T_0} (1 + \gamma(T - T_0))} \right)^{-1}$$

Sfortunatamente questa espressione non può essere usata per calcolare la temperatura perché la variabile T è sia a destra che a sinistra dell'uguale. È possibile invertire in modo esatto la (7), ottenendo una espressione lunga e complicata da calcolare a causa di cancellazioni numeriche.

In [5] viene suggerito di fare una prima stima grezza della temperatura, usando il modello esponenziale (3), e poi usare questa temperatura stimata T_s per calcolare quella più precisa in questo modo:

$$(8) \quad T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln \frac{R}{R_0}}{B_{T_0}(1 + \gamma(T_s - T_0))} \right)^{-1}$$

Usando questa tecnica di calcolo e trovando la temperatura corrispondente alle resistenze "esatte" si è ottenuto l'errore mostrato in figura



NTC Fra.PNG

L'errore rimane al di sotto di ± 100 mK in un intervallo di temperatura compreso fra circa -40 °C fino a 85 °C. Anche usando la funzione inversa esatta, non riportata qui, l'errore rimane praticamente invariato.

Le migliori prestazioni del modello di Fraden sono dovute al fatto che questo modello ha due parametri liberi, oltre al valore di riferimento, con cui si può adattare la funzione matematica al componente reale.

Da ricordare che questa precisione è stata ottenuta calibrando il modello sullo specifico componente: usando i valori di γ suggeriti in [5] l'errore sarebbe stato di circa 2 °C.

Modello BGS

Il modello BGS è stato proposto nel 1950 [5][8], ed è basato su questa relazione empirica, mostrata sia nella forma con R'_∞ sia con R_0 .

L'apice usato sul coefficiente B' e su R'_∞ indica che questi non sono gli stessi valori del modello esponenziale.

$$(9) \quad R(T) = R'_\infty e^{\frac{B'}{T+\theta}} = R_0 e^{B' \left(\frac{1}{T+\theta} - \frac{1}{T_0+\theta} \right)}$$

Al solito entrambe le formule hanno lo stesso numero di parametri liberi perché la resistenza e la temperatura nominali sono legate da $R'_\infty = R_0 e^{\left(\frac{-B'}{T_0+\theta} \right)}$.

Slomovitz in [9] fornisce le relazioni per trovare B' e θ a partire dal valore di B fornito dal costruttore per il comune modello esponenziale. Le relazioni ottenute ricavando i valori da un best fit quadratico su una dozzina di NTC [7] sono:

$$(10) \quad B' = 2.332B - 3268 \text{ K} \quad \text{e} \quad \theta = 0.00179B' - 42.7 \text{ K}$$

Con queste formule si ottiene $B' = 6006 \text{ K}$ e $\theta = 64.8 \text{ K}$. Usando questi valori l'errore che si ottiene nella conversione da resistenza a temperatura nell'intervallo da -35°C a 85°C è dell'ordine di svariati kelvin, poiché le relazioni fornite sono state valutate in forma statistica su alcuni dispositivi, mentre le tecnologie di produzione cambiano con il produttore e il tempo.

Anche in questo caso per ottenere buone precisizioni è necessario effettuare una calibrazione per il singolo componente, o la singola serie di componenti. Il modello ha due punti liberi, oltre al riferimento di $10 \text{ k}\Omega$ a 25°C , e si useranno gli stessi valori del modello di Fraden, riportati in tabella 2. Procedendo analogamente a quanto fatto nella precedente sezione, equazioni (6), questa volta però sostituendo le equazioni del modello BGS, si ha

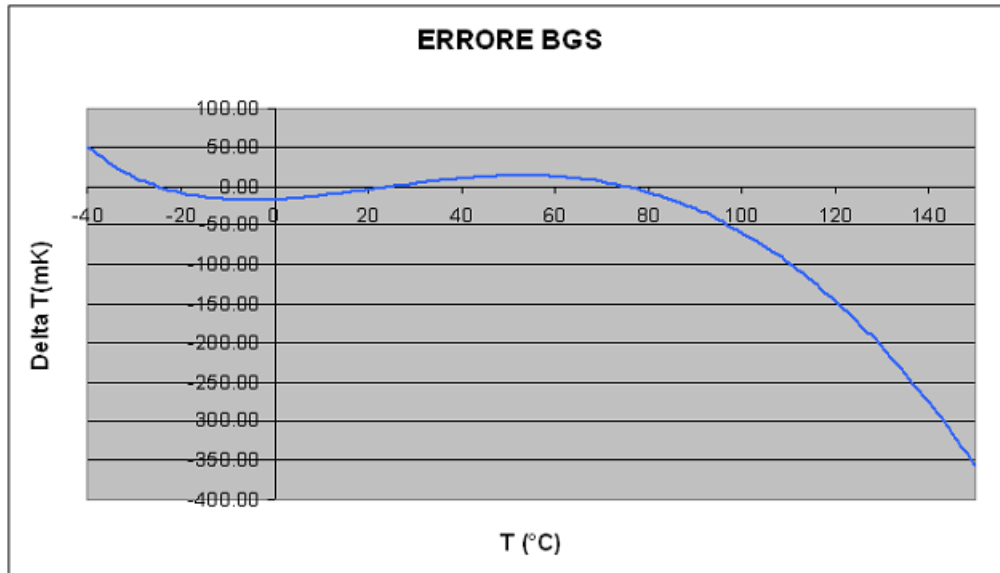
$$(11) \quad \begin{cases} 129289\Omega = 10000\Omega \cdot e^{B' \left(\frac{1}{248.15\text{K}+\theta} - \frac{1}{298.15\text{K}+\theta} \right)} \\ 1480.94\Omega = 10000\Omega \cdot e^{B' \left(\frac{1}{348.15\text{K}+\theta} - \frac{1}{298.15\text{K}+\theta} \right)} \end{cases}$$

Risolvendo le due equazioni si trovano i valori $B' = 5178 \text{ K}$ e $\theta = 45.9 \text{ K}$, abbastanza diversi dai valori calcolati con le indicazioni fornite in [9].

Invertendo l'equazione (9), per calcolare la temperatura avendo la resistenza si ottiene:

$$(12) \quad T = \frac{B'T_0 - \theta(T_0 + \theta) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)}{(T_0 + \theta) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + B'}$$

L'errore ottenuto con il modello BGS è mostrato nella figura seguente:



ERR BGS.PNG

Benche' il grafico dell'errore sia simile al modello di Fraden, le scale sono molto diverse. Nell'intervallo da $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'errore massimo e' di $\pm 50\text{ mK}$ mentre a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'errore massimo e' di circa 360 mK , molto minore dei 2.3 K del modello di Fraden nella stessa condizione.

La classifica della precisione dei modelli analizzati vede quindi come piu' preciso il modello SH, seguito da quello BGS, poi quello di Fraden, e il meno preciso, perche' con meno gradi di liberta', e' quello esponenziale.

Bisogna pero' dire che per piccoli intervalli di temperatura anche il modello esponenziale ha parecchie applicazioni.

Altri modelli

Esistono svariati altri modelli per descrivere la relazione temperatura-resistenza delle NTC, ad esempio Becker [10] ha proposto nel 1946 una relazione di questo tipo:

$$(12) \quad R(T) = AT^c e^{B/T}$$

Cordella [11] invece ha proposto nel 1982, sempre su basi empiriche, quest'altra relazione

$$(13) \quad R(T) = R_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{A \exp(BT/T_0)}$$

Altri modelli ancora sono basati su sviluppi polinomiali di Lagrange [7] di secondo e terzo grado, ma si puo' dimostrare che al piu' sono equivalenti al modello di SH con 4 coefficienti.

Quasi sempre i costruttori di termistori forniscono solo i coefficienti del modello esponenziale, e solo più raramente viene fornito anche il modello SH. I dati degli altri modelli in generale devono essere ricavati con una calibrazione, che però permette di eliminare gli errori dovuti alle tolleranze.

Effetto delle tolleranze

Gli errori considerati in precedenza riguardano solo la precisione del modello, non le tolleranze del componente.

Poiché sia gli errori del modello che quelli dovuti alle tolleranze sono piccoli, si possono sommare per trovare l'errore complessivo, a meno che non si effettui una calibrazione del componente.

Conoscere l'effetto delle tolleranze del singolo componente è importante quando si vuole poter sostituire una NTC con un'altra dello stesso tipo, senza fare nessuna calibrazione.

Le tolleranze di una NTC vengono fornite solo per i parametri R_0 e B , ma queste informazioni sono sufficienti per calcolare l'errore sulla lettura di temperatura.

La valutazione dell'errore avviene trovando la resistenza di un NTC in funzione di T con un modello esponenziale applicando le tolleranze sui parametri, poi trasformando la resistenza in temperatura con i parametri nominali.

In pratica si calcola una temperatura stimata $T_s = T(R'(T))$ e valutando l'errore come $T_e = T_s - T$. L'apice nell'equazione sta a indicare che il passaggio da temperatura a resistenza viene fatto con i parametri affetti da tolleranza, mentre quello da resistenza a temperatura è calcolato con i parametri nominali.

L'espressione della temperatura stimata vale quindi:

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{B T_0}{T_0 \ln \left(\frac{R'(T)}{R_0} \right) + B} = \frac{B T_0}{T_0 \ln \left(\frac{R_0 e^{B'(1/T - 1/T_0)}}{R_0} \right) + B} = \\
 (14) \quad &= \frac{B T_0}{T_0 \ln \left(\frac{R'_0}{R_0} \right) + B + B' \left(\frac{T_0 - T}{T} \right)}
 \end{aligned}$$

Per trovare le variazioni assolute su T_s a causa delle variazioni relative di un parametro, è necessario valutare la sensibilità semirelativa [12] delle variazioni di T_s rispetto a B' e R'_0 . La definizione di sensibilità semirelativa richiede il calcolo della derivata parziale della grandezza di cui si vuole valutare la variazione rispetto al parametro che varia, moltiplicata poi per il valore del parametro stesso. Ad esempio la sensibilità rispetto a R'_0 è data da

$$(15) \quad \tilde{S}_{R'_0}^{T_s} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial R'_0} \right|_{\text{nom}} R'_0$$

Dove i valori nominali da introdursi dopo aver valutato la derivata sono $R'_0 = R_0$ e $B' = B$.

Il risultato di (15), dopo tutte le semplificazioni vale

$$(16) \quad \tilde{S}_{R'_0}^{T_s} = -\frac{T^2}{B}$$

e quindi l'errore assoluto di temperatura ΔT dovuto alla tolleranza *relativa* del valore della resistenza nominale $\delta_{R'_0}$ vale

$$(17) \quad \Delta T = \tilde{S}_{R'_0}^{T_s} \delta_{R'_0} = -\frac{T^2}{B} \delta_{R'_0}$$

Lo stesso procedimento viene applicato anche al coefficiente B' . In modo analogo a prima calcolando la sensibilit  semirelativa e sostituendo i valori nominali si ottiene:

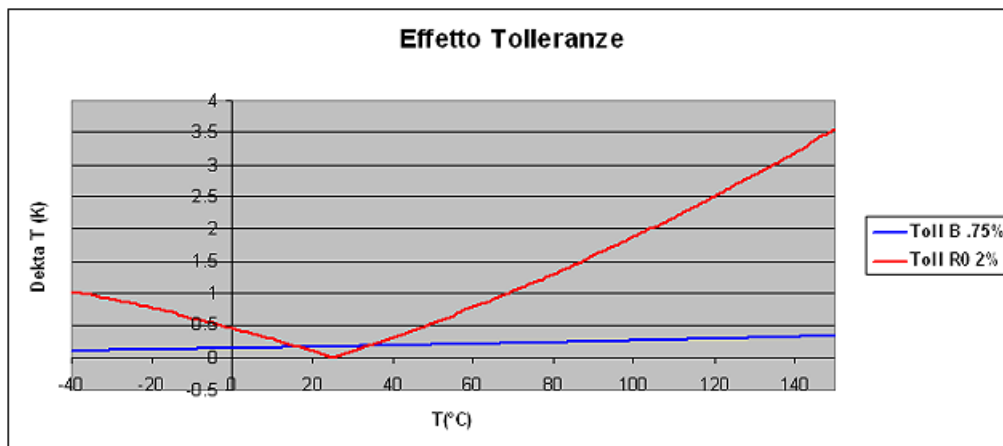
$$(18) \quad \tilde{S}_{B'}^{T_s} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial B'} \right|_{\text{nom}} B' = \frac{T}{T_0} (T - T_0)$$

e l'errore assoluto di temperatura ΔT dovuto alla tolleranza *relativa* $\delta_{B'}$ del fattore B' vale quindi:

$$(19) \quad \Delta T = \frac{T}{T_0} (T - T_0) \delta_{B'}$$

Tutti gli apici si riferiscono ai parametri del termistore "reale", con tolleranze, il cui valore resistivo viene convertito in temperatura con i coefficienti di un termistore ideale.

L'effetto delle tolleranze dell'NTC usato come esempio, prendendo come da datasheet $\delta_B = 0.75\%$ e $\delta_{R_0} = 2\%$, si ha il grafico seguente, dove in rosso   rappresentato l'effetto di tolleranza della resistenza mentre in blu quello del parametro B . Gli errori sono stati rappresentati con segno positivo, ma possono avere entrambi i segni, dato che la tolleranza   specificata sia in piu   che in meno rispetto al nominale.



TOLL.PNG

L'effetto principale in questo componente è dato dalla tolleranza di R_0 . In un intervallo limitato di temperatura, ad esempio fra $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la somma dei due errori dovuti alle tolleranze è al di sotto di 0.5 K e se questo errore massimo è accettabile, questo componente è sostituibile con un altro con lo stesso part number senza dover ricalibrare il sistema.

Conclusioni

Dopo questa lunga analisi, le conclusioni sono semplici. Se si vuole una precisione dell'ordine dei millikelvin è necessario usare il modello di Steinhart e Hart, calibrando il componente in un laboratorio di metrologia. Se si utilizzano i coefficienti di SH forniti dal costruttore si eliminano gli errori del modello, ma non quelli delle tolleranze del singolo componente.

Se invece ci si accontenta di precisioni del modello dell'ordine del kelvin (possibilmente su intervalli di temperatura non troppo grandi) il modello esponenziale è più che adeguato, e spesso non è richiesta una calibrazione del singolo componente per eliminare l'effetto delle tolleranze, oppure la calibrazione può essere semplificata misurando l'NTC a un solo valore di temperatura.

Infine per necessità di precisione "intermedia", dell'ordine quindi del centinaio di millikelvin, a meno di non essere in intervalli di temperatura ristretti, è necessario usare uno dei modelli di complessità intermedia, quali quello di Fraden o meglio BGS. Per quest'ultimo caso è comunque necessario calibrare il singolo componente, misurandone la resistenza a tre temperature diverse.

Bibliografia

[1] [NTC Vishay, serie NTCLE100](#)

[2] IsidoroKZ, [Progetto termostato I - Proprietà delle NTC](#), Electroyou Sett 2011

[3] Steinhart J.S., Hart S.R., Calibration curves for thermistors, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Volume 15, Issue 4, August 1968, Pages 497-503

[4] Fraden J., A two-point calibration of negative temperature coefficient thermistors. Rev. Sci. Instrum. 71(4), 1901–1905, Apr. 2000.

[5] Bosson, Gutmann, and Simmons. A relationship between resistance and temperature of thermistors, J. Appl. Phys., Vol. 21, Pages 1267-8, December 1950

[6] Fraden J., Handbook of Modern Sensors, AIP Press - Springer, New York 2004, [ISBN 0-387-00750-4](#)

[7] Slomovitz D., The Temperature-Resistance Curve of NTC Thermistors. Test and Measurement World, May 1987, p. 73-79

[8] Slomovitz D., and Gomez D., Influence of Resistance-Temperature Models of Thermistors on the Behavior of Linearizing Circuits, Int. J. of Electronics, 1990, Vol. 69, No. 5. pag. 691-696.

[9] Slomovitz D., and Joskowicz J., [Error Evaluation of Thermistor Linearizing Circuits](#), Measurement Science and Technology, Vol 1 pag. 1280-1284 Dec. 1990

[10] Becker J.A., Green C.B., and Pearson G.L. Properties and Uses of Thermistors, Trans. of American Inst. of Electrical Engineers, Vol 65, p. 711-725, November 1946.

[11] Cordella R. H., A Heuristic Thermistor Model, IEEE Trans. on Circ. and Syst. VOL. CAS-29, No. 4, April 1982, p. 272-276

[12] IsidoroKZ [Sensitivity I - Definizioni e Applicazioni - Electroyou 2010](#)

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Isidorokz:progetto-termostato-iii-errori-e-linearizzazione-ntc>"