



Isidoro KZ (IsidoroKZ)

PROGETTO TERMOSTATO VII: LINEARIZZAZIONE ANALITICA DI UNA NTC

7 December 2011

Introduzione

In quest'ultimo articolo dedicato alle NTC e alla misura della temperatura, si continuerà a trattare il problema della linearizzazione, già iniziato due articoli fa [1], dove era stata mostrata una linearizzazione fatta quasi a buon senso, senza sapere a quali errori si poteva andare incontro, notando solo che sembravano aumentare con il cubo dell'ampiezza dell'intervallo di temperatura.

In questo articolo invece sarà **analizzato matematicamente** il problema della linearizzazione, vale a dire progettata a tavolino, in modo da ottenere sia un circuito "ottimo" che una stima degli errori. Il risultato non sarà tanto diverso da quella fatta in modo "ingenuo".

Tutte le soluzioni descritte in letteratura cercano di ottenere da un componente con caratteristica non lineare, che ha una resistenza dipendente esponenzialmente dalla temperatura [2][3], una tensione più o meno lineare in modo da poter realizzare un termometro con l'uso di un semplice voltmetro. L'idea base è quella di sfruttare il flesso del rapporto di partizione, e lavorare in quell'intorno.

Poiché tutti i circuiti lineari di linearizzazione hanno le stesse prestazioni e gli stessi errori, come dimostrato in [4] e [5], si lavorerà sul caso del semplice partitore resistivo.

Verranno illustrate tre tecniche per determinare la pendenza della retta approssimante, calcolando e mostrando gli errori dei tre metodi.

VORSICHT! Questo articolo contiene parecchia matematica, se non vi piace, non leggete oltre :)

Linearizzazione analitica

In questa sezione verrà mostrato come fare i conti per linearizzare una NTC in un intervallo voluto, e come valutare l'errore residuo della linearizzazione. In un articolo precedente [1] si era proceduto "ad occhio", qui invece la linearizzazione sarà sviluppata in modo più preciso.

Il problema da risolvere è di questo tipo: data una NTC di valore R_0 alla temperatura T_0 , o equivalentemente avente $R_\infty = R_0 e^{-B/T_0}$, e volendo linearizzare la risposta alla temperatura nell'intervallo da $T_{\min}$ a $T_{\max}$, quale resistenza in serie si deve usare e qual è il massimo errore commesso? Oppure, equivalentemente, avendo linearizzato l'NTC intorno ad una temperatura T_c ,

qual e' il massimo intervallo di temperatura misurabile affinche' l'errore rimanga al di sotto di un valore prefissato?

L'idea base e' di far coincidere il flesso della funzione di partizione con la temperatura centrale dell'intervallo che si vuole misurare e poi scegliere la pendenza della **retta linearizzante** in modo da minimizzare l'errore massimo nell'intervallo, analogamente a quanto era stato fatto con la linearizzazione "ingenua".

Le operazioni da fare sono un sviluppo in serie di Taylor della funzione di partizione

$K = \frac{R(T)}{R_{eq} + R(T)}$ introdotta nell'articolo precedente [4], oppure anche il rapporto $p = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R(T)}$ definito in [1] e mostrato in figura 1: la differenza fra questi due rapporti e' solo nel punto di riposo e nei segni delle derivate, ma per il resto le prestazioni in termini di errori sono assolutamente uguali.

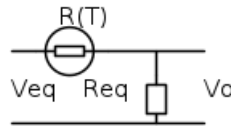


Figura 1 - Circuito di riferimento

Una volta ottenuto lo sviluppo in serie della funzione di partizione si calcola il valore di R_{eq} in modo da portare il flesso alla temperatura centrale dell'intervallo, e si valutano in quel punto le altre derivate dello sviluppo in serie. Da queste derivate si possono usare differenti tecniche per stabilire la pendenza della retta linearizzante, che passa comunque per il punto di flesso.

Sviluppo in serie di Taylor e calcolo di R_{eq}

La funzione da sviluppare in serie di potenze di T e'

$$(1) \quad p(T) = 1 - K(T) = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R(T)} = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_{\infty} e^{B/T}} = \frac{1}{1 + r e^{1/u}}$$

La funzione scelta e' $p(T) = 1 - K(T)$ perche' ha la derivata prima positiva, cosa che sembra piu' intuitiva: quando la temperatura cresce, la tensione di uscita cresce. Ho indicato anche la versione della formula con la resistenza normalizzata $r = \frac{R_{\infty}}{R_{eq}}$ e temperatura normalizzata $u = \frac{T}{B}$.

. Le grandezze normalizzate non saranno usate in questo articolo, ma si trovano in molti articoli [5][6][7], con nomi piu' o meno simili.

Lo sviluppo in serie della funzione di partizione in funzione della temperatura, intorno alla temperatura centrale dell'intervallo T_c dove (sperabilmente) c'e' il flesso, vale

$$(2) \quad p(T_c + h) = p(T_c) + hp'(T)|_{T=T_c} + \frac{h^2 p''(T)}{2!} \Big|_{T=T_c} + \dots + \frac{h^n p^{(n)}(T)}{n!} \Big|_{T=T_c} + \dots$$

dove $h = T - T_c$ e' la temperatura corrente misurata come differenza rispetto alla temperatura centrale T_c

Per forzare il flesso alla temperatura T_c e' necessario che a quella temperatura la derivata seconda sia nulla. Facendo calcolare la derivata a un programma di derivazione simbolica, si ha

$$(3) \quad p'' = \frac{BR_{eq}R_{\infty} e^{B/T} (R_{\infty} e^{B/T} (B - 2T) - R_{eq} (B + 2T))}{T^4 (R_{\infty} e^{B/T})^3} = 0$$

La condizione affinche' la derivata seconda sia zero alla temperatura T_c da' la condizione di progetto della resistenza R_{eq} del partitore:

$$(4) \quad R_{eq} = R_{\infty} e^{B/T_c} \frac{B - 2T_c}{B + 2T_c} = R(T_c) \frac{B - 2T_c}{B + 2T_c}$$

La relazione (4) e' quella che va sotto il nome di relazione di linearizzazione, e permette di posizionare il flesso alla temperatura voluta T_c . Il rapporto di partizione e le prime quattro derivate alla temperatura centrale dell'intervallo, calcolate con un programma simbolico, valgono:

$$(5) \quad \begin{cases} p(T_c) = \frac{B - 2T_c}{2B} \\ p'(T_c) = \frac{(B + 2T_c)(B - 2T_c)}{4BT_c^2} = \frac{B^2 - 4T_c^2}{4BT_c^2} = \frac{B}{4T_c^2} - \frac{1}{B} \\ p''(T_c) = 0 \\ p'''(T_c) = \frac{B(B + 2T_c)(B - 2T_c)}{8T_c^6} = -\frac{B^2}{2T_c^4} p'(T_c) \\ p^{(iv)}(T_c) = \frac{B(B + 2T_c)(2T_c - B)}{2T_c^7} = \frac{2B^2}{T_c^5} p'(T_c) \end{cases}$$

La derivata seconda e' nulla perche' si e' imposto che il flesso sia alla temperatura centrale T_c . Lo sviluppo in serie di Taylor del rapporto di partizione intorno alla temperatura T_c dove e' stato messo il flesso e' vale:

$$(6) \quad p(T_c + h) = p(T_c) + hp'(T_c) - h^3 \frac{B^2}{3! 2T_c^4} p'(T_c) + h^4 \frac{2B^2}{4! T_c^5} p'(T_c) + \dots$$

Si e' sfruttato il fatto che nei termini di ordine superiore e' presente l'espressione della derivata prima, in questo modo si riesce a scrivere il risultato in forma piu' compatta.

I termini in h^3 e superiori costituiscono l'errore di linearizzazione. Andando a valutare il rapporto fra il termine di quarto ordine ϵ_4 e quello di terzo ordine ϵ_3 si ha:

$$(7) \quad \frac{\epsilon_4}{\epsilon_3} = \frac{h^4 \frac{2B^2}{4!T_c^5} p'(T_c)}{-h^3 \frac{B^2}{3!2T_c^4} p'(T_c)} = -\frac{h}{T_c}$$

Se l'intervallo di temperatura h in cui si è linearizzato e si valuta l'errore è molto minore della temperatura centrale T_c in pratica se $h \leq 20$ K circa, allora si può troncare lo sviluppo in serie al terzo ordine, considerando un errore praticamente solo di tipo cubico, che conferma l'osservazione empirica fatta in [1].

Inoltre se si considerano solo le variazioni di temperatura intorno a T_c e si annullano tutti gli offset, si possono togliere i termini costanti e si ottiene:

$$(8) \quad \Delta p(h) \approx h p'(T_c) - h^3 \frac{B^2}{3!2T_c^4} p'(T_c)$$

La variabile $\Delta p(h)$ definita in (8) è la funzione di partizione approssimata con il solo termine cubico e traslata in modo da passare per il flesso con $h = 0$

Questa espressione sarà quella usata per calcolare le varie approssimazioni lineari e valutarne gli errori.

Linearizzazione à la Taylor

Il primo modo che può venire in mente per linearizzare la funzione intorno al flesso è di usare una retta che passa per il flesso e che ha lo stesso coefficiente angolare della funzione, vale a dire $p'(T_c)$. In pratica si approssima la funzione con i primi due termini della serie di Taylor. La retta approssimante è quindi

$$(9) \quad \Delta p_a(h) = p'(T_c)h = \frac{(B + 2T_c)(B - 2T_c)}{4BT^2}h$$

La grandezza $\Delta p_a(h)$ è il valore approssimato (pedice a) del rapporto di partizione con lo zero spostato nel punto di flesso.

L'errore sul valore di partizione E_p è dato dalla differenza della variazione "vera" meno la variazione stimata. Il "vera" è fra virgolette perché essa stessa è una approssimazione, avendo considerato lo sviluppo solo fino al terzo ordine.

$$(10) \quad \begin{aligned} E_p &= \Delta p(h) - \Delta p_a(h) = h p'(T_c) - h^3 \frac{B^2}{3!2T_c^4} p'(T_c) - p'(T_c)h = \\ &= -h^3 \frac{B^2}{3!2T_c^4} p'(T_c) \end{aligned}$$

La grandezza $p'(T_c)$ e' la pendenza vera della funzione di partizione nel punto di flesso.

Per trasformare l'errore sul rapporto di partizione in errore di temperatura E_T bisogna dividerlo per la pendenza della retta approssimante, ottenendo:

$$(11) \quad E_T = -\frac{E_p}{p'(T_c)} = h^3 \frac{B^2}{12T_c^4}$$

Il segno negativo dipende dal fatto che anche per la temperatura si vuole l'errore sotto forma di valore vero meno valore stimato.

Nella figura seguente e' rappresentato in giallo la funzione originale e in rosso la funzione approssimante, tangente nel punto centrale dell'intervallo, ad $h = 0$. In blu e' rappresentato il generico errore sul fattore di partizione e lo stesso errore riportato in temperatura.

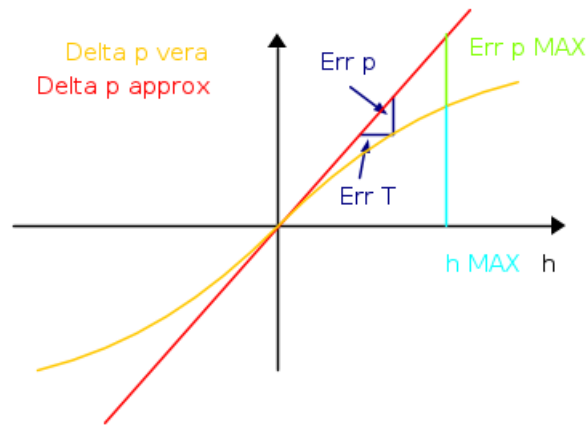


Figura 2 - Approssimazione tangente

Nella stessa figura e' anche stato indicato il valore massimo h_{MAX} di semiampiezza dell'intervallo di temperatura, dato da $h_{MAX} = T_{max} - T_c = T_c - T_{min}$. Si vede facilmente sia dalla figura 2 che dall'equazione (11) che l'errore massimo avviene all'estremo dell'intervallo di misura.

Esempio numerico

Proviamo a linearizzare il solito termistore da $10 \text{ k}\Omega$ [8] (con $B = 3977 \text{ K}$) nell'intervallo di temperatura fra 5°C e 40°C , come era gia' stato fatto in [1].

La temperatura centrale dell'intervallo e' $T_c = 22.5^\circ\text{C} = 295.65 \text{ K}$ e usando il modello esponenziale dell'NTC, dall'equazione (4) si ottiene la resistenza equivalente:

$$(12) \quad R_{eq} = 10 \text{ k}\Omega e^{3977\text{K}(\frac{1}{295.65\text{K}} - \frac{1}{298.15\text{K}})} \frac{3977\text{K} - 2 \times 295.65\text{K}}{3977\text{K} + 2 \times 295.65\text{K}} = 8296 \Omega$$

La sensibilità del circuito con questa resistenza è data dal valore di $p'(T_c)$ (dall'equazione (5)),

$$(13) \quad p'(T_c) = \frac{3977 \text{ K}}{4(295.65 \text{ K})^2} - \frac{1}{3977 \text{ K}} = 0.01112 \text{ K}^{-1}$$

e questo valore moltiplicato per la tensione di alimentazione V_{eq} , ad esempio 5 V dà la sensibilità riferita alla tensione:

$$(14) \quad \frac{dV_o}{dT} = p'(T_c) V_{eq} = 0.01112 \times 5 \text{ V} = 55.62 \text{ mV/K}$$

L'errore massimo di questa approssimazione si ha per $h_{MAX} = T_{max} - T_c = 40^\circ\text{C} - 22.5^\circ\text{C} = 17.5 \text{ K}$ e dall'equazione (11) si ha:

$$(15) \quad E_{T_{MAX}} = h^3 \frac{B^2}{12T_c^4} = (17.5 \text{ K})^3 \frac{(3977 \text{ K})^2}{12(295.65 \text{ K})^4} = 0.92 \text{ K}$$

Facendo i conti su EXCEL con il modello esponenziale, si ottiene il seguente grafico dell'errore di misura:

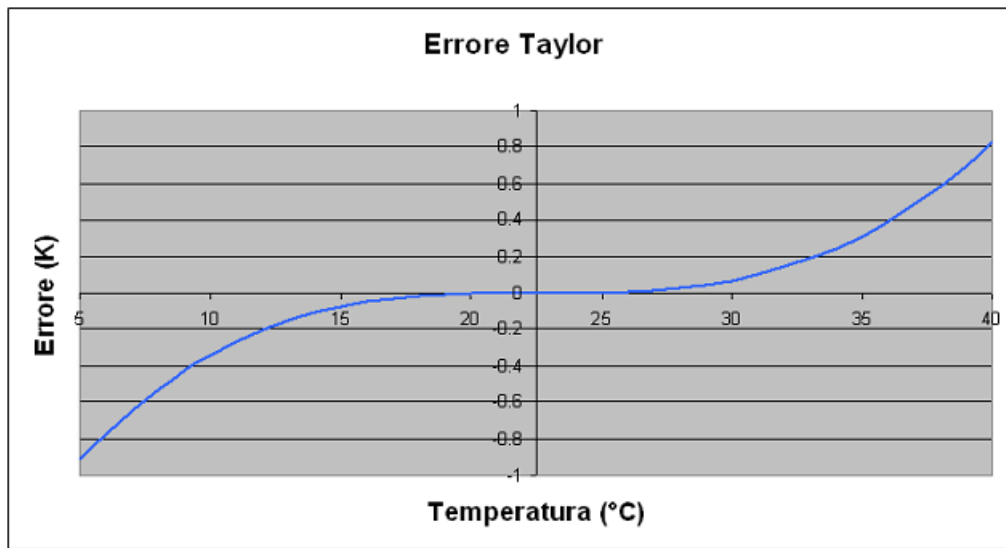


Figura 3 - Errore con linearizzazione tangente

L'errore massimo occorre all'estremità dell'intervallo, ed è di circa 0.9 K. L'asimmetria dell'errore dipende dai termini dal quarto in su nello sviluppo di Taylor. Le approssimazioni che fanno uso delle serie di Taylor danno una ottima approssimazione intorno al punto di sviluppo, ma l'errore aumenta rapidamente allontanandosi da esso, come si vede in figura 3.

Linearizzazione con i punti estremi

Una migliore approssimazione su tutto l'intervallo era già stata proposta in [9], e consiste nel modificare la pendenza della retta approssimante in modo da passare attraverso la curva reale all'estremità dell'intervallo di approssimazione. In pratica si annulla l'errore agli estremi dell'intervallo, come mostrato in figura 4.

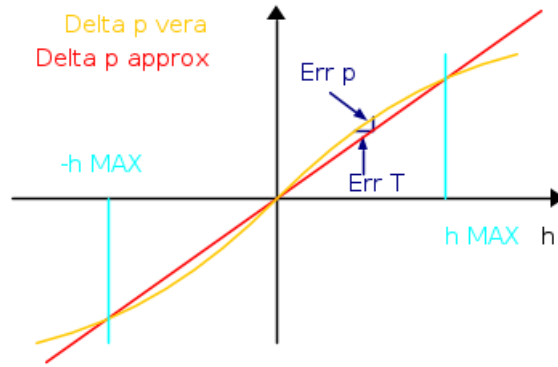


Figura 4 - Approssimazione punti estremi

La pendenza della retta approssimante è data dal valore effettivo del fattore di partizione all'estremo dell'intervallo $p(h_{MAX})$, diviso per l'ampiezza del semintervallo h_{MAX} . Il valore della partizione all'estremo è calcolato con l'approssimazione cubica.

$$(16) \quad p'_a = \frac{p(h_{MAX})}{h_{MAX}} = \frac{h_{MAX}p'(T_c) - h_{MAX}^3 \frac{B^2}{3! 2T_c^4} p'(T_c)}{h_{MAX}} =$$

$$= p'(T_c) \left(1 - h_{MAX}^2 \frac{B^2}{12T_c^4} \right) = p'(T_c)(1 - \delta)$$

La grandezza p'_a è la pendenza della retta approssimante (pedice a), mentre $p'(T_c)$ è la pendenza vera della funzione di partizione alla temperatura T_c dove è stato posizionato il flesso.

Procedendo analogamente al caso precedente, si calcola l'errore di partizione, e lo si riporta come errore in temperatura:

$$(17) \quad E_p = hp'(T_c) - h^3 \frac{B^2}{12T_c^4} p'(T_c) - hp'(T_c)(1 - \delta) = \frac{B^2}{12T_c^4} h(h_{MAX}^2 - h^2) p'(T_c)$$

Per riportare l'errore sulla partizione in errore di temperatura, si divide per la pendenza della retta approssimante:

$$(18) \quad E_T = \frac{E_p}{p'(1 - \delta)} = \frac{\frac{B^2}{12T_c^4} h(h_{MAX}^2 - h^2) p'(T_c)}{p'(T_c) \left(1 - h_{MAX}^2 \frac{B^2}{12T_c^4} \right)} = \frac{B^2 h(h^2 - h_{MAX}^2)}{B^2 h_{MAX}^2 - 12T_c^4}$$

Derivando E_T rispetto allo scostamento h della temperatura dal punto centrale e uguagliando a zero il risultato si trova il punto di massimo errore:

$$(19) \quad 0 = \frac{d}{dh} \left(\frac{B^2 h (h^2 - h_{MAX}^2)}{B^2 h_{MAX}^2 - 12T_c^4} \right) \rightarrow h_{maxerr} = \pm \frac{\sqrt{3} h_{MAX}}{3}$$

e il corrispondente errore massimo di temperatura risulta essere:

$$(20) \quad E_{Tmax} = \frac{2\sqrt{3} B^2 h_{MAX}^3}{9 (12T_c^4 - B^2 h_{MAX}^2)}$$

Esempio numerico

Anche in questo caso la resistenza equivalente è la stessa di prima, come pure la tensione di uscita alla temperatura centrale dell'intervallo. Cambia invece il guadagno rappresentato dalla derivata approssimante $p'_a(T_c)$, sviluppando l'equazione (16)

$$(21) \quad p'_a = \frac{(B^2 - 4T_c^2)(12T_c^4 - B^2 h_{MAX}^2)}{48BT_c^6} = 0.010536 \text{ K}^{-1}$$

La sensibilità, al solito assumendo una tensione di alimentazione di 5 V e di 53.68 mV/K

L'errore massimo di temperatura, calcolata con l'equazione (20) vale

$$(22) \quad \begin{aligned} E_{Tmax} &= \frac{2\sqrt{3} B^2 h_{MAX}^3}{9 (12T_c^4 - B^2 h_{MAX}^2)} = \\ &= \frac{2\sqrt{3} (3977\text{K})^2 (17.5\text{K})^3}{9 (12(295.65\text{K})^4 - (3977\text{K})^2 (17.5\text{K})^2)} = 0.376\text{K} \end{aligned}$$

L'errore massimo si ha per $T = T_c \pm h_{MAX}/\sqrt{3} = (32.6; 12.4)^\circ\text{C}$

Il grafico dell'errore, calcolato senza nessuna approssimazione, è in figura 5.

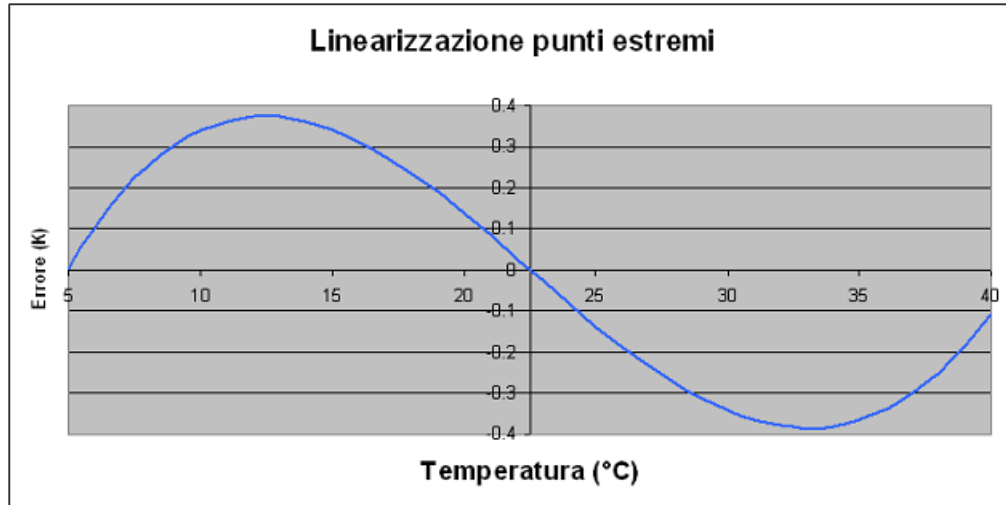


Figura 5 - Errore Linearizzazione punti estremi

Dall'immagine si nota che l'errore è nullo agli estremi dell'intervallo: la differenza sull'estremo destro è dato dal fatto che nel calcolo dell'approssimazione si sono trascurati i termini di Taylor dal quarto in su. L'errore massimo si ha nei punti previsti e anche l'ampiezza è del valore calcolato.

Linearizzazione ad errore minimo

È possibile ridurre ulteriormente l'errore di linearizzazione cambiando la pendenza p'_a della retta approssimante, in modo da avere un errore che cambia segno all'interno di ciascuna metà dell'intervallo, e imponendo che l'errore sul punto estremo sia uguale in modulo all'errore che si ha all'interno dell'intervallo.

L'idea, abbozzata in precedenti pubblicazioni [11][12], ma che io sappia mai sviluppata analiticamente, è illustrata in figura 6

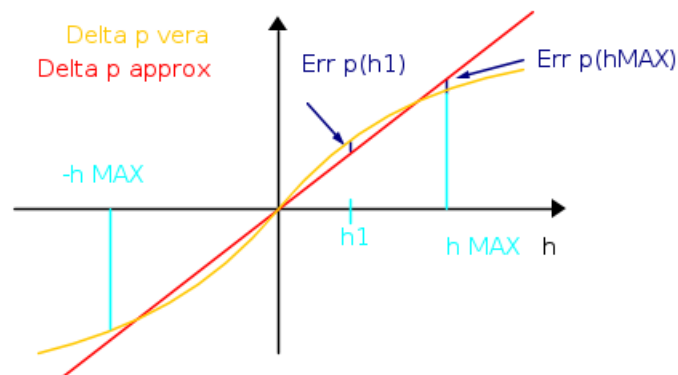


Figura 6 - Approssimazione Errore minimo

Il calcolo della pendenza della retta avviene uguagliando l'errore all'estremo dell'intervallo con l'errore, cambiato di segno, che si ha dentro l'intervallo.

L'errore $E_p(h_{MAX})$ all'estremo dell'intervallo vale

$$(23) \quad E_p(h_{MAX}) = h_{MAX} p'_a - \left(h_{MAX} p'(T_c) - h_{MAX}^3 \frac{B^2}{12T_c^4} p'(T_c) \right)$$

Il massimo errore interno all'intervallo capita alla temperatura h_1 che viene determinata differenziando l'espressione dell'errore e uguagliando a zero la derivata:

$$(24) \quad \begin{aligned} \frac{dE_p}{dh} &= \frac{d}{dh} \left(h p'_a - \left(h p'(T_c) - h^3 \frac{B^2}{12T_c^4} p'(T_c) \right) \right) = \\ &= p'_a - p'(T_c) \left(1 - \frac{B^2 h^2}{4T_c^4} \right) = 0 \end{aligned}$$

da cui cercando il valore di h che soddisfa l'equazione si ottiene:

$$(25) \quad h_1 = \pm \frac{2T_c^2}{B} \sqrt{1 - \frac{p'_a}{p'(T_c)}}$$

L'errore di partizione alla temperatura h_1 è ottenuto sostituendo questo valore al posto di h_{MAX} in (23), ottenendo dopo qualche semplificazione:

$$(26) \quad E_p(h_1) = (p'_a - p'(T_c)) \frac{4T_c^2}{3B} \sqrt{1 - \frac{p'_a}{p'(T_c)}}$$

Ora che si hanno i due errori, li si uguaglia, con un segno negativo perché gli errori hanno segno opposto (figura 6), e si ricava l'incognita p'_a

$$(27) \quad \begin{aligned} h_{MAX} \left(p'_a - p'(T_c) \left(1 - h_{MAX}^2 \frac{B^2}{12T_c^4} \right) \right) = \\ = - (p'_a - p'(T_c)) \frac{4T_c^2}{3B} \sqrt{1 - \frac{p'_a}{p'(T_c)}} \end{aligned}$$

Risolvendo l'equazione (27) per trovare la pendenza p'_a dell'approssimazione si ha finalmente il risultato cercato:

$$(28) \quad p'_a = p'(T_c) \left(1 - \frac{B^2 h_{MAX}^2}{16T_c^4} \right)$$

Con questa scelta ottimale di pendenza, l'errore massimo sul fattore di partizione, ricavato da (23) oppure da (26) vale

$$(29) \quad E_p = \pm \frac{B^2 h_{MAX}^3}{48 T_c^4}$$

e dividendo per la pendenza p'_a si ottiene l'errore massimo in temperatura:

$$(30) \quad E_{Tmax} = \frac{B^2 h_{MAX}^3}{3(B^2 h_{MAX}^2 - 16 T_c^4)}$$

L'errore massimo si ha agli estremi dell'intervallo di approssimazione e, dalla (25), in $h_1 = h_{MAX}/2$.

La funzione ha errore nullo nel punto centrale dell'intervallo e alle temperature $T_c \pm h_{MAX} \frac{\sqrt{3}}{2}$ che corrispondono a circa il 6.7% e 93.3% dell'intero intervallo.

Se si vuole utilizzare la tecnica di calcolo descritta in [1] e [10], si devono usare come valori di temperatura a cui fare i conti i punti al 6.3%, 50%, 93.3 % di tutto l'intervallo $T_{max} - T_{min}$. Nell'articolo sulla linearizzazione "ingenua" si erano date delle indicazioni approssimate dei punti di calcolo, ricavati dall'esperienza e "ad occhio". Qui invece si sono fatti i conti precisi con l'approssimazione cubica del rapporto di partizione.

Esempio numerico

Anche in questo caso il punto di flesso e la resistenza R_{eq} sono gli stessi di prima, cambia solo la pendenza approssimante con cui viene interpretato il segnale che arriva dal partitore. In pratica si deve cambiare solo il guadagno dell'amplificatore del segnale, oppure ridefinire le tensioni che rappresentano il fondoscala delle temperature.

Dall'equazione (28) si calcola la pendenza della retta approssimante, che al solito passa per il punto di flesso:

$$(31) \quad p'_a = 0.01112 K^{-1} \left(1 - \frac{(3977K \times 17.5K)^2}{16 \times (295.15K)^4} \right) = 0.01068 K^{-1}$$

e la sensibilit , con la solita alimentazione vale 53.4 mV/K

L'errore massimo   dato dall'equazione (30) e vale:

$$(32) \quad E_{Tmax} = \frac{(3977K)^2 (17.5K)^3}{3((3977K)^2 (17.5K)^2 - 16(295.65K)^4)} = 0.24 K$$

L'errore massimo   ancora minore dei casi precedenti, ed   anche leggermente minore del caso di linearizzazione "ingenua". Il grafico dell'errore, calcolato senza approssimazioni,   in figura 7

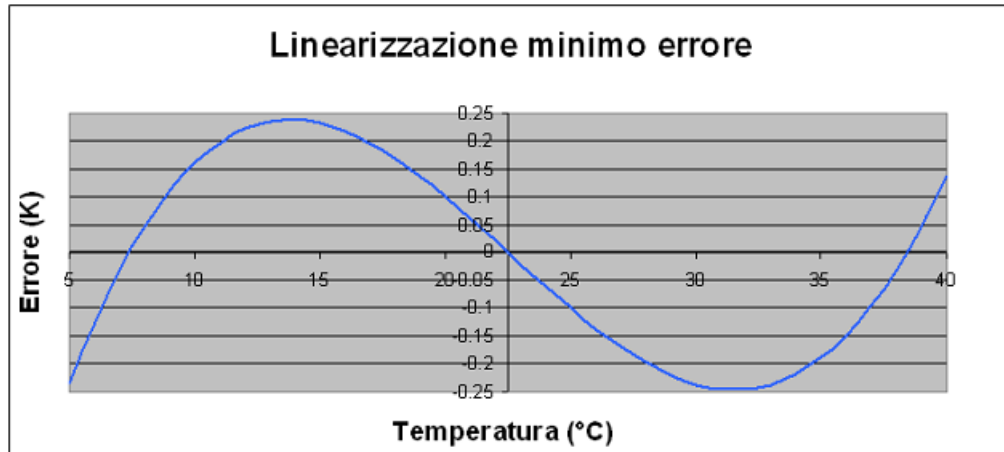


Figura 7 - Errore linearizzazione minimo errore

Anche in questo caso l'errore effettivo e'` ottimamente stimato dall'approssimazione cubica utilizzata per trovare la pendenza della retta approssimante.

Conclusioni

In questo articolo sono state presentate tre linearizzazioni: le prime due sono state proposte fin dagli albori dell'uso delle ntc. La terza pur essendo stata intuita, non mi risulta che sia stata sviluppata analiticamente.

La differenza di queste tre linearizzazioni e'` semplicemente la pendenza della retta approssimante, ovvero il guadagno dell'amplificatore che segue il partitore con l'NTC.

Nei precedenti 6 articoli di questa serie sono stati presentati una introduzione alle NTC, il progetto di un termostato di tipo attacca/stacca sia come metodo generale che con un esempio, l'effetto degli errori dei modelli e delle tolleranze dei componenti. Infine e'` stata presentato il problema della linearizzazione per la misura della temperatura, ed e'` stata mostrata una breve rassegna bibliografica di articoli pubblicati con alcuni risultati importanti sulla linearizzabilità.

Non credevo di arrivare alla fine di questa serie :).

Ringraziamenti

Un ringraziamento a DirtyDeeds che ha avuto la pazienza di discutere con me alcuni dettagli a cui non avevo prestato attenzione: sempre una buona occasione per imparare qualcosa di nuovo.

Bibliografia

[1] IsidoroKZ, [Progetto Termostato V - Linearizzazione "Ingenua" di una NTC](#), Electroyou 2011.

- [2] IsidoroKZ, [Progetto Termostato I - Proprieta` delle NTC](#) - Electroyou 2011
- [3] IsidoroKZ, [Progetto termostato IV - NTC: errori dei modelli e tolleranze](#) - Electroyou 2011
- [4] IsidoroKZ, [Progetto-termostato VI - Rassegna bibliografica e linearizzabilita`](#), Electroyou 11/2011
- [5] Diamond J.M., Linearization of Resistance Thermometers and Other Transducers, The Review of Scientific Instruments, Vol. 41, No. 1, January 1970, p. 53-60.
- [6] Tsai C.F., Li L.T., Li C.H., Young M.S.; Implementation of Thermistor Linearization Using LabVIEW, Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, IIH-MSP '09., Kyoto Sept 2009, p. 530-533
- [7] Bowman M.J., On the Linearity of a Thermistor Thermometer, Radio and Electronic Engineer, Vol. 39, No. 4, Apr. 1970, p. 209-214.
- [8] [NTC Vishay, serie NTCLE100 NTC da 10k \$\Omega\$](#)
- [9] Beakley W.R., The Design of Thermistor Thermometers with Linear Calibration, J. Sci. Instr., Vol 28, June 1951, p. 176-179.
- [10] Jamieson J., Thermistors—a simple means of getting accurate readings of temperature, Electronics Education, Vol. 1990, Issue 1, Spring 1990, p. 10-11.
- [11] Khan A., Linearization of Thermistor Thermometer, Int. J. of Electronics, 1985, Vol. 59, No. 2, p. 129-139.
- [12] Slomovitz D., and Joskowicz J., Error Evaluation of Thermistor Linearizing Circuits, Meas. Sci. Technol. Vol 1, No. 12, Dec. 1990, p. 1280-1284

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Isidorokz:progetto-termostato-vii-linearizzazione-analitica-di-una-ntc>"