Isidoro KZ (IsidoroKZ)

PROGETTO TERMOSTATO I - PROPRIETA` DELLE NTC

5 September 2011

Questa serie di articoli deriva da due **richieste capitate sul forum** a poca distanza di tempo, riguardanti il progetto di un semplice termostato con sensore NTC, richieste per le quali ho riciclato lo stesso schema utilizzante un operazionale e pochi altri componenti.

Al giorno d'oggi il modo piu` semplice per realizzare un termostato consiste nell'usare un microcontrollore, un sensore di temperatura e poco piu`. In alcuni casi pero` si preferisce ancora utilizzare un circuito analogico, il piu` delle volte un semplice comparatore con isteresi che aziona un rele`. Per questa ragione ho messo in pulito quanto avevo scritto gia` sul forum, integrandolo con informazioni generali che avevo lasciato da parte.

Come al solito sono andato lungo con la chiaccherata e al posto di un solo articolo ne sono venuti fuori N (per ora 4). Il primo analizza le **caratteristiche delle NTC**, in particolare come leggerne il **datasheet** e illustra i principali **modelli matematici** che rappresentano la caratteristica resistenza-temperatura.

Il secondo e terzo articolo riguardano il progetto circuitale vero e proprio, analizzando prima teoricamente i blocchi funzionali che servono per il termostato ed effettuando poi un primo dimensionamento del circuito del termostato, in pratica un progetto di prima approssimazione per vedere se si sta facendo un circuito ragionevole. L'ultimo infine tratta la linearizzazione delle NTC quando le si voglia usare per leggere la temperatura senza usare un microcontrollore per linearizzarne la caratteristica, analizzando anche effetto di tolleranze e di errori di modello.

Il tutto, e` ovvio, perche' **ai mici piace stare al caldo** :-)

Proprieta` delle NTC

Un termistore a coefficiente di temperatura negativa, NTC, e` un resistore il cui valore dipende fortemente dalla temperatura, con coefficiente negativo: all'aumentare della temperatura la resistenza dell'NTC diminuisce esponenzialmente. Un NTC e` fatto di ceramica sinterizzata utilizzando una miscela di due ossidi metallici (tipicamente scelti fra ossido di manganese, nickel, cobalto, ferro, rame, titanio e uranio).

Questa ceramica si comporta approssimativamente come un semiconduttore intrinseco, non drogato, in cui il numero di portatori liberi, e quindi la sua conduttanza, dipende esponenzialmente dalla temperatura assoluta del materiale.

Termistori NTC basati su semiconduttori "normali", principalmente germanio ma anche silicio, esistono ma sono prevalentemente limitati a temperature criogeniche. Oltre i 100 K per il germanio e i 200 K per il silicio iniziano fenomeni di interazioni con i fononi che cambiano il coefficiente di temperatura, fino a farlo diventare positivo.

Il vantaggio delle NTC e` la loro elevata sensibilita` alle variazioni di temperatura (molti percento al kelvin, a differenza dei sensori al platino) sensibilita` che permette di misurare facilmente variazioni di temperatura con risoluzioni dell'ordine dei millikelvin e precisioni dello stesso ordine di grandezza. Altro importante vantaggio e` il fatto che misurano la temperatura assoluta, non la differenza fra due temperature come invece capita con le termocoppie.

Il loro svantaggio principale e` la variazione fortemente non lineare della resistenza con la temperatura e il relativo ristretto intervallo di temperature in cui possono lavorare, -40C +150C per i normali componenti ceramici. Inoltre possono essere danneggiati meccanicamente, o quando sono sottoposti a temperature troppo elevate o basse.

Modelli di comportamento

Esistono piu` modelli matematici per descrivere la variazione di resistenza di una NTC in funzione della temperatura, oppure per trovare la temperatura data la resistenza misurata. Il piu` semplice e tradizionale si basa sulla relazione esponenziale che deriva dalla teoria della conduzione dei semiconduttori, senza nessuna correzione aggiunta.

Un modello molto piu` preciso e` quello di Steinhart e Hart [2] proposto nel 1968 da due geofisici che avevano la necessita` di misurare con maggiore precisione la temperatura del mare. Calibrando una NTC con questo modello si riesce a misurare una temperatura con una precisione dell'ordine del millikelvin.

Infine un modello piu` recente e piu` semplice di quello di Steinhart e Hart, anche se un po' meno preciso, e` stato proposto da Fraden [3] nel 2000 e fornisce precisioni dell'ordine del centesimo di kelvin.

Esempio di una famiglia di NTC

Prima di addentrarci nei vari modelli matematici che descrivono il comportamento dei termistori, vediamo un esempio con una famiglia di componenti reali, la serie NTCLE100E3 prodotta dalla Vishay, analizzando le caratteristiche importanti riprese dal data sheet [1]

QUICK REFERENCE DATA		
PARAMETER	**VALUE**	**UNIT**
Resistance value at 25 °C	3.3 to 470K	Ω
Tolerance on R_{25}-value	± 2; ± 3; ± 5	%
$B_{25/85}$-value	2880 to 4570	K
Tolerance on $B_{25/85}$-value	± 0.5 to ± 3	%
Operating temperature range: At zero power dissipation; continuously At zero power dissipation; for short periods	- 40 to + 125 ≤ 150	°C
Response time (in oil)	≈ 1.2	s
Thermal time constant τ (for information only)	15	s
Dissipation factor δ (for information only)	7 8.5 (for R_{25}-value ≤ 680 Ω)	mW/K
Maximum power dissipation at 55 °C	500	mW

NTCTAB2.png

Come si vede dalla tabella, sono disponibili valori nominali di resistenza a $25\,^\circ\mathrm{C}$ da $3.3\,\Omega$ fino a $470\,\mathrm{k}\Omega$ con tolleranze sulla resistenza nominale dal 2% al 5%. Il fattore B (beta, anche se sembra a una B maiuscola), descritto nel seguito, varia a seconda della resistenza nominale, e quindi dell'impasto usato, da $2880\,\mathrm{K}$ fino a $4570\,\mathrm{K}$, con tolleranze che vanno dallo 0.5% fino al 3%. Maggiore la tolleranza del valore resistivo e del parametro beta, maggiore l'errore che si commette misurando una temperatura.

Il parametro B e\` indicato con il pedice 25/85 perche' mentre a livello teorico dovrebbe essere una costante in realta\` varia un po' con la temperatura, e il costruttore ne indica il valore medio sull'intervallo di temperatura da $25\,^\circ\mathrm{C}$ a $85\,^\circ\mathrm{C}$.

Come detto in precedenza, l'intervallo di utilizzo delle NTC "comuni" e\` abbastanza ristretto e solo per brevi periodi di tempo i termistori di questa serie possono arrivare a $150\,^\circ\mathrm{C}$.

I due successivi tempi di risposta sono le costanti termiche in olio e in aria e indicano in quanto tempo il componente indica una variazione di temperatura pari al 63.2% della variazione complessiva di temperatura, supposta istantanea.

In pratica si prende il termistore equilibrio termico con l'ambiente a $25\,^\circ\mathrm{C}$ e lo si immerge il termistore in un bagno d'olio a $85\,^\circ\mathrm{C}$ o in un flusso di aria sempre a $85\,^\circ\mathrm{C}$, e si osserva in quanto tempo la temperatura rivelata e` di $63\,^{\circ}\mathrm{C}$ circa, vale a dire il 63.2% della differenza fra le due temperature piu` la temperatura iniziale.

Nel giro di qualche costante di tempo (in pratica da 3 a 7, a seconda della precisione voluta), la temperatura dell'NTC arriva praticamente a quella del mezzo in cui e` immersa. In caso di misura della temperatura in aria ferma e precisioni molto elevate, questo tempo puo` essere anche di parecchi minuti.

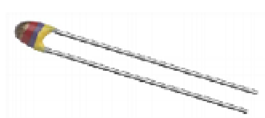
Il parametro successivo, Dissipation Factor δ, e` la conduttanza termica dell'NTC, e dice quanta potenza deve dissipare in aria ferma perche' la temperatura del componente aumenti di $1\,\mathrm{K}$. Questo parametro e` particolarmente importante per misure in aria ferma, perche' per conoscere la temperatura bisogna misurare la resistenza, e questo si puo` solo fare facendo scorrere una corrente attraverso l'NTC, provocando un autoriscaldamento per effetto Joule e di conseguenza un errore di lettura.

Modelli matematici temperatura-resistenza

Esistono svariati modelli che descrivono il comportamento temperatura-resistenza degli NTC. Nel seguito sara` preso come esempio un termistore da $10\,\mathrm{k\Omega}$ della famiglia le cui caratteristiche generali sono state illustrate prima. Il datasheet riporta per questo specifico componente i seguenti dati:

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION

R_{25}	$B_{25/85}$-VALUE		UL APPROVED	SAP MATERIAL NUMBER	OLD 12NC CODE	COLOR CODE (3)		
(Ω)	(K)	(± %)	(Y/N)	NTCLE100E3....B0/T1/T2 (2)	2381 640 3/4/6.... (1)	I	II	III
4700	3977	0.75	Y	472*B0	*472	Yellow	Violet	Red
5000	3977	0.75	Y	502*B0	*502	Green	Black	Red
6800	3977	0.75	Y	682*B0	*682	Blue	Grey	Red
10 000	3977	0.75	Y	103*B0	*103	Brown	Black	Orange



NTCTAB1.png

I parametri elettrici importanti sono la resistenza alla temperatura nominale, $25\,^{\circ}\mathrm{C}$, la sua tolleranza, riportata in una nota, puo` essere 2%, 3% o 5%. Il parametro $\mathrm{B}$ e` una caratteristica del materiale ceramico e dipende dagli ossidi usati, il suo valore e` in kelvin, e la sua tolleranza indica la bonta` del processo e del materiale. Gli altri dati sono il codice del componente e la codifica del valore in fasce colorate, a partire dal basso, dove ci sono i reofori. L'NTC mostrato in figura e` da $4.7\,\mathrm{k\Omega}$ con tolleranza del 5% (anche se il colore oro sulla cima del componente e` scarsamente visibile).

Modello esponenziale

Il modello esponenziale e` il piu` semplice disponibile e si basa su considerazioni teoriche della fisica dello stato solido. Per determinarne i parametri si misura l'NTC a **due** temperature e si risolve un semplice sistema di equazioni. Questo modello, semplice da usare e da calcolare, ha una precisione limitata: l'errore che ci si puo` aspettare in un intervallo da $0\,°\mathrm{C}$ a $70\,°\mathrm{C}$, a parte le tolleranze dei parametri, puo` essere dell'ordine di $1\,°\mathrm{C}$.

Questo modello e` il modello di riferimento per il calcolo degli errori dovuti alle tolleranze dell'NTC, e` facile da maneggiare e piu` che sufficiente quando si possa fare una messa in punto del sistema (ad esempio un termostato a temperatura fissa con un potenziometro di taratura). Nel modello esponenziale il legame fra temperatura e resistenza e` dato da

$$R(T) = R_{T_0}\mathrm{e}^{\mathrm{B}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} = R_\infty \mathrm{e}^{\frac{\mathrm{B}}{T}} \qquad (1)$$

dove $R(T)$ e` la resistenza alla temperatura $T$, $R_{T_0}$ e` la resistenza ad una specifica temperatura di riferimento, tipicamente $T_0 = 25\,°\mathrm{C}$, la costante B, talvolta anche indicata in minuscolo β dipende dal materiale che forma il termistore.

L'espressione puo` essere semplificata per comodita` di manipolazione matematica usando la costante $R_\infty = R_{T_0}\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{B}}{T_0}}$ che rappresenta il valore resistivo estrapolato che il termistore avrebbe a temperatura infinita.

Le temperature nelle formule indicate sono assolute, in kelvin, e per usare unita` piu` "umane" e` necessario uno scalamento di $273.15\,\mathrm{K}$, come indicato qui di seguito:

$$R(T) = R_{T_0}\mathrm{e}^{\mathrm{B}\left(\frac{1}{T+273.15\mathrm{K}}-\frac{1}{T_0+273.15\mathrm{K}}\right)} = R_\infty \mathrm{e}^{\frac{\mathrm{B}}{T+273.15\mathrm{K}}} \qquad (2)$$

Considerando che normalmente la temperatura di riferimento e` di $25\,°\mathrm{C}$ si ha:

$$R(T) = R_{25°\mathrm{C}}\mathrm{e}^{\mathrm{B}\left(\frac{1}{T+273.15\mathrm{K}}-\frac{1}{298.15\mathrm{K}}\right)} = R_\infty \mathrm{e}^{\frac{\mathrm{B}}{T+273.15\mathrm{K}}} \qquad (3)$$

Data la resistenza misurata, per trovare la temperatura si devono invertire le relazioni (1), ottenendo

$$T = \frac{\mathrm{B}}{\ln\left(\frac{R(T)}{R_{T_0}}\right)+\frac{\mathrm{B}}{T_0}} = \frac{\mathrm{B}}{\ln\left(\frac{R(T)}{R_\infty}\right)} \qquad (4)$$

e per avere il risultato in gradi Celsius per un termistore con temperatura di riferimento di $25\,°\mathrm{C}$ si devono fare i soliti scalamenti:

$$T = \frac{\mathrm{B}}{\ln\left(\frac{R(T)}{R_{25°\mathrm{C}}}\right)+\frac{\mathrm{B}}{298.15\,\mathrm{K}}} - 273.15\,\mathrm{K} \qquad (5)$$

Mentre se si vuole usare l'espressione con R_∞ si ha

$$T = \frac{\mathrm{B}}{\ln\left(\frac{R(T)}{R_\infty}\right)} - 273.15\,\mathrm{K} \qquad (6)$$

Il valore del parametro B e` in ogni caso **sempre** in kelvin.

Mettiamo i numeri

Questa e` la parte semplice: il produttore indica i valori della resistenza a $25\,°\mathrm{C}$ e di B e basta sostituirli nelle formule di prima. Prendendo come esempio l'NTC da $10\,\mathrm{k\Omega}$ si ha, per temperature T in gradi Celsius

$$R(T) = 10\mathrm{k\Omega}\,\mathrm{e}^{3977\mathrm{K}\left(\frac{1}{273.15\mathrm{K}+T} - \frac{1}{298.15\mathrm{K}}\right)} \qquad (7)$$

Per usare l'espressione con R_∞, bisogna prima calcolarlo:

$$R_\infty = R_{T_0}\,\mathrm{e}^{-\frac{B}{T_0}} = 10\mathrm{k\Omega}\,\mathrm{e}^{-\frac{3977\mathrm{K}}{298.15\mathrm{K}}} = 10\mathrm{k\Omega}\,\mathrm{e}^{-13.34} = 16.1\,\mathrm{m\Omega} \qquad (8)$$

e di conseguenza la relazione per l'NTC da $10\,\mathrm{k\Omega}$ si ha

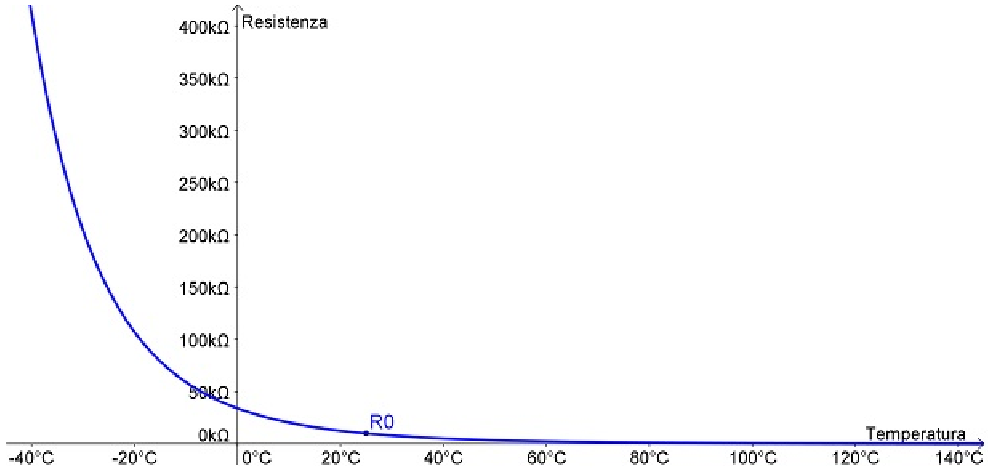
$$R(T) = 16.1\mathrm{m\Omega}\,\mathrm{e}^{\frac{3977\mathrm{K}}{273.15\mathrm{K}+T}} \qquad (9)$$

La maggiore compattezza di quest'ultima espressione, comoda quando si fanno i conti letterali, non e` cosi` attraente quando si passa a fare i conti numerici, perche' manca una indicazione esplicita del valore dell'NTC: si legge una resistenza di **milliohm** riferita a un componente dell'ordine dei **kiloohm**.

La relazione inversa che permette di trovare la temperatura in funzione della resistenza vale

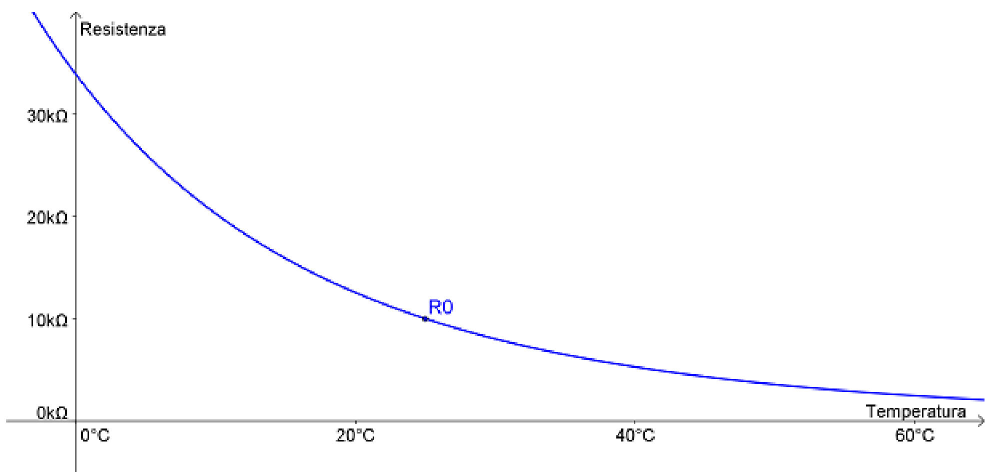
$$T = \frac{3977\mathrm{K}}{\ln\left(\frac{R(T)}{10\mathrm{k\Omega}}\right) + \frac{3977\mathrm{K}}{298.15\mathrm{K}}} - 273.15\mathrm{K} \qquad (10)$$

Il grafico successivo mostra la variazione di resistenza su tutto il campo di temperatura: si vede come dal valore nominale di $10\,\mathrm{k\Omega}$ alla temperatura di $25\,°\mathrm{C}$ (punto indicato con R0), si passa a circa $400\,\mathrm{k\Omega}$ a $-40\,°\mathrm{C}$ e a un valore praticamente illeggibile ($244\,\Omega$ calcolati) a $140\,°\mathrm{C}$. La curva e` evidentemente fortemente non lineare.



NTCGR3.jpg

Anche limitando la temperatura a un intervallo piu` umano, ad esempio da $0\,°\mathrm{C}$ a $60\,°\mathrm{C}$, si ha sempre una variazione non lineare, come mostrato nella curva seguente



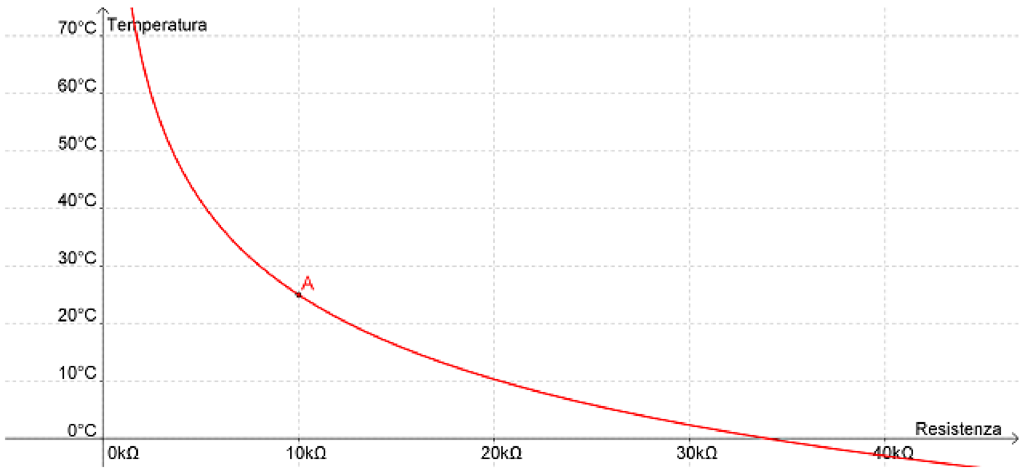
NTCGR2.png

La variazione relativa di resistenza per ogni kelvin di variazione di temperatura, indicata nei cataloghi come parametro α, e` la sensibilita` semirelativa [4] di R rispetto a T e risulta essere

$$\tilde{S}_T^R = \frac{\partial R}{\partial T}\frac{1}{R} = \frac{\partial}{\partial T}\left(R_{T_0}\mathrm{e}^{B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)}\right)\frac{1}{R_{T_0}\mathrm{e}^{B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)}} = -\frac{\mathrm{B}}{T^2} = \alpha \qquad (11)$$

Questo parametro e` dell'ordine di svariati percento, e diminuisce all'aumentare della temperatura. Per l'NTC usato in questo esempio, si ha $\alpha = -5.3\,\%/\mathrm{K}$ a $0\,°\mathrm{C}$, $\alpha = -4.5\,\%/\mathrm{K}$ a $25\,°\mathrm{C}$ e $\alpha = -3.6\,\%/\mathrm{K}$ a $60\,°\mathrm{C}$. Questi valori sono da confrontarsi ad esempio con la sensibilita` dei sensori resistivi al platino, PT100, che hanno una sensibilita` $\alpha = 0.385\,\%/\mathrm{K}$, oltre un ordine di grandezza piu` bassa. Inoltre le PT100 hanno una resistenza bassa ($100\,\Omega$ nominali) e la resistenza dei fili di collegamento puo` introdurre degli errori di misura, mentre gli NTC, avendo delle resistenze tipicamente molto piu` alte, rendono trascurabile questo errore.

Il legame inverso che permette di trovare la temperatura data la resistenza, ricavato analiticamente in (4) e (10), e` rappresentato in questa figura, dove il punto A indica la condizione di temperatura e resistenza nominale.



NTCGR1.png

Anche qui si nota l'elevata sensibilita` dell'NTC ma anche la sua elevata non linearita`.

Il modello esponenziale puo` essere usato su intervalli di misura dell'ordine di svariate decine di kelvin avendo degli errori di misura, senza contare le tolleranze, dell'ordine del grado Celsius, ed e` il modello normalmente usato per calcolare l'effetto delle tolleranze dei parametri, per fare i conti analitici, specie quando si puo` tarare il sistema.

Modello di Steinhart e Hart

Il modello di Steinhart e Hart [2] e` stato proposto dai due geofisici nel 1968 per calibrare i termistori usati nella misura della temperatura di mari e oceani. Lo scopo degli autori era di trovare una relazione unica che coprisse un ampio campo di temperatura interesse, che fornisse come risultato la temperatura assoluta, fosse una relazione facile da calcolare senza instabilita` numeriche e i cui parametri fossero determinabili con poche misure e migliorabili con ulteriori misure usando i minimi quadrati.

Il lavoro dei due autori e` stato di ricerca di una funzione matematica che avesse una buona aderenza con i dati, non basata su modelli fisici di comportamento del termistore. Dopo aver provato un centinaio di diverse funzioni, contenenti da 2 a 5 parametri liberi, lavorando su dati ricavati da una ventina di termistori, hanno selezionato la funzione che dava la migliore precisione di misura della temperatura, con errori dell'ordine del millikelvin o meno.

La funzione proposta in [2] e` la seguente:

$$T = \frac{1}{A + B\ \ln(R) + C\ \ln^3(R)} \qquad (12)$$

dove R e` la resistenza del termistore alla temperatura $T$ e $A$, $B$, $C$ sono tre costanti che dipendono dal valore del termistore e dal materiale con cui e` stato costruito. Il termine in $\ln^2(R)$ non era stato incluso perche' il suo contributo era trascurabile e soprattutto peggiorava la precisione del modello. Dal punto di vista metrologico l'espressione (12) e` un obbrobrio, non ha senso calcolare il logaritmo di una resistenza!

Questo modello e` stato poi generalizzato, includendo di nuovo il termine quadratico e fornendo anche la relazione inversa che permette di trovare la resistenza in funzione della temperatura, ed e` stato scritto in modo dimensionalmente corretto.

Le relazioni che oggigiorno vanno sotto il nome di relazioni o equazioni (estese) di Steinhart e Hart sono le seguenti (o espressioni equivalenti)

$$T(R) = \frac{1}{A_1 + B_1\ \ln\left(\frac{R(T)}{R_{T_0}}\right) + C_1\ \ln^2\left(\frac{R(T)}{R_{T_0}}\right) + D_1\ \ln^3\left(\frac{R(T)}{R_{T_0}}\right)} \qquad (13)$$

$$R(T) = R_{T_0}\ \mathrm{e}^{(A+B/T+C/T^2+D/T^3)} \qquad (14)$$

I coefficienti di queste relazioni vengono trovati da 4 (o piu`) misure di temperatura e resistenza e permettono di ottenere un modello con una precisione migliore di $1\ \mathrm{mK}$ nell'intervallo fra $0\ ^\circ\mathrm{C}$ e $70\ ^\circ\mathrm{C}$ come riportato in [5].

Il vantaggio di questa versione piu` moderna di Steinhart e Hart in cui essenzialmente si e` evidenziato il valore nominare dell'NTC e` che i coefficienti non dipendono dal singolo termistore, ma solo dal materiale utilizzato nella costruzione, coefficienti che possono essere forniti dal costruttore. Ricavare questi coefficienti con un elevato grado di precisione richiede infatti un laboratorio di metrologia della temperatura, dato che si devono avere dei campioni di temperatura piu` precisi di quanto si vuole ottenere dal modello.

Mettiamo i numeri

Nel caso del termistore in esame, i coefficienti delle equazioni di Steinhart e Hart sono forniti direttamente dal costruttore nel datasheet del componente, riportato qui di seguito, dove sono mostrati i coefficienti di tre materiali, fra cui quello con $\mathrm{B} = 3977\,\mathrm{K}$

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

Da notare un errore nel datasheet: mentre le unita` dei primi 4 parametri, come definiti in (14) sono corrette, le unita` di misura di $A_1,\ B_1,\ C_1,\ D_1$, usate in (13) sono sbagliate: tutti questi coefficienti sono in K^{-1}.

"Mettere i numeri" in questo caso diventa facile, se i coefficienti sono forniti dal costruttore, altrimenti il modello non e` praticamente utilizzabile, a meno di non avere a disposizione un laboratorio di metrologia della temperatura.

Modello di Fraden

Il modello di Fraden e` nato per correggere un errore del modello esponenziale che considera il fattore $\mathrm{B}$ come costante, mentre in realta` esso ha delle variazioni con la temperatura. Per ovviare parzialmente a questo inconveniente i costruttori forniscono un dato di B mediato su un intervallo di temperatura, ma pur sempre una costante.

Il modello di Fraden considera il valore di B lineramente dipendente dalla temperatura secondo questa relazione

$$\mathrm{B}(T) = \mathrm{B}_{T_0}(1+\gamma(T-T_0)) \qquad (15)$$

Questa espressione di B viene poi usata nell'equazione esponenziale (1) ottenendo

$$R(T) = R_{T_0}\mathrm{e}^{\mathrm{B}_{T_0}(1+\gamma(T-T_0))\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} \qquad (16)$$

Fraden dice che mentre il valore di B_{T_0} ha delle tolleranze fra un componente e l'altro anche di qualche percento, il suo coefficiente di variazione γ e` abbastanza costante e ripetitivo ed vale circa $\gamma = 0.0007\,\mathrm{K}^{-1}$ per NTC dell'ordine di $R_{T_0} = 100\,\mathrm{k\Omega}$ aumentando fino a circa $\gamma = 0.0008\,\mathrm{K}^{-1}$ per NTC nell'intervallo da $R_{T_0} = 1\,\mathrm{k\Omega}$ a $R_{T_0} = 10\,\mathrm{k\Omega}$. Un esempio di variazione del parametro beta e` nella seguente figura [5]

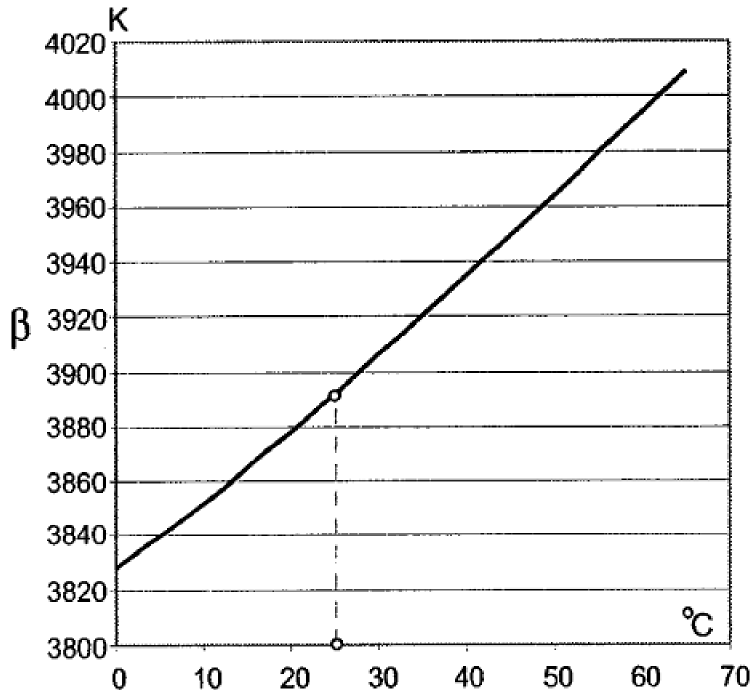


FIG. 1. Temperature dependence of β. Nominal value of a thermistor is 100 kΩ at 25 °C.

NTCGR3.png

Mettiamo i numeri

La difficolta` del modello di Fraden e` che i costruttori non forniscono il valore di γ, che pero` e` abbastanza stabile per i vari termistori, ne' il valore di B_{T_0} ad una specifica temperatura. In caso di necessita` e` possibile ricavare questi due valori, insieme con la resistenza nominale R_{T_0} da tre misure di temperatura e resistenza, e poi per altri termistori dello stesso lotto si puo` assumere γ costante e limitarsi a due misure per avere B_{T_0} e R_{T_0}.

Anche in questo caso va fatto notare che le misure di temperatura devono essere fatte con precisioni migliori di quello che il modello puo` fornire, ovvero dell'ordine della decina di millikelvin. Un modello numerico sara` valutato nell'ultima puntata, parlando di errori e linearizzazione.

Conclusioni

Questo primo articolo ha mostrato le caratteristiche dei termistori a coefficiente di temperatura negativo (NTC), basandosi su un esempio di un componente reale, e indicando tre possibili relazioni resistenza-temperatura.

Il modello piu` spesso utilizzato per applicazioni domestiche e` il semplice modello esponenziale. Per applicazioni di metrologia e` invece indispensabile utilizzare il modello di Steinhart e Hart. Per applicazioni che richiedono una discreta precisione, ma non a livello di millikelvin, con produzione di massa, in cui bisogna calibrare in forma numerica i vari termistori (ad esempio nei termometri clinici), il modello di Fraden potrebbe essere una buona alternativa in quanto richiede solo due misure di temperatura per ottenere i parametri variabili da un termistore all'altro.

Bibliografia

[1] NTC Vishay, serie NTCLE100

[2] 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

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

[4] IsidoroKZ Sensitivity I - Definizioni e Applicazioni - Electroyou 2010

[5] Mangum B.W., Triple point of succinonitrile and its use in the calibration of thermistor thermometers, Rev. Sci. Instrum., Vol. 54, No. 12, December 1983, pag. 1687