

Принципы построения систем температурного контроля на NTC-термисторах компании Epcos

Виталий ЗОТОВ
zotovvv@yandex.ru

Статья посвящена исследованию работы терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, рассмотрению преимуществ и недостатков применения термисторов, принципам построения систем измерения и контроля температуры, а также факторам, влияющим на работу термисторов в качестве датчиков температуры, и снижению погрешности измерительной системы.

Потребность измерения температуры и управления ей возникает во многих сферах деятельности человека. А основными требованиями к результатам измерения и управления, как всегда, оказываются скорость и точность, независимо от того, где используется прибор — в быту или в промышленности. В основе любого измерения, в том числе и температуры, положен датчик, и как первостепенный элемент он определяет технико-экономические показатели системы контроля в целом. Применение того или иного вида термочувствительного элемента опять же зависит от требований, предъявляемых к системе в целом, и не говорит о полном преимуществе одного датчика над другими. Для промышленного применения, как правило, используются термопары или резистивные термопреобразователи, выполненные в виде законченных устройств. Непригодность этих термочувствительных элементов для повсеместного использования объясняется высокой ценой применяемых материалов и невозможностью удаленного контроля из-за сравнительно маленьких величин выходных параметров, которые сильно подвержены влиянию внешних факторов. Все большее применение находят датчики интегрального исполнения, имеющие низкую нелинейность выходной характеристики от температуры и достаточно малую стоимость, но именно интегральное исполнение является «ахиллесовой пятой» этих элементов ввиду ограниченности рабочего температурного диапазона. Другое дело — терморезисторы с отрицательным ТКС (отрицательный температурный коэффициент сопротивления, или NTC — Negative Temperature Coefficient) — они имеют достаточно большой диапазон рабочих температур, возможность удаленного мониторинга, действуют в сильных магнитных полях. Но есть недостатки, такие как слож-

ная повторяемость экземпляров и сильная нелинейность температурной характеристики, что в свою очередь усложняет и повышает стоимость всего изделия. Так было до прихода микроконтроллеров, на «плечи» которых и будет возложена конечная задача по линеаризации и математической обработке температурной характеристики.

Основные параметры и характеристика NTC-термисторов

В рабочем диапазоне температур зависимость сопротивления терморезистора от температуры достаточно точно описывается выражением [1]:

$$R_T = R_N \times e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right)}, \quad (1)$$

где R — сопротивление рабочего тела терморезистора при данной температуре T , Ом; R_N — номинальное сопротивление терморезистора при температуре T_N , Ом; T , T_N — температура, К; B — коэффициент, постоянный для данного экземпляра терморезистора (паспортные данные).

Любой NTC-терморезистор кроме температурной характеристики описывается рядом параметров, без которых невозможно полное представление о работе данного типа термодатчиков. Далее приводятся определения основных параметров.

Материал, из которого изготовлен термистор, сохраняет свои свойства при температурах, не выходящих за рамки определенного диапазона, который называют допустимой температурой. При температурах, выходящих за эти пределы, в сенсоре могут произойти необратимые изменения, и он выйдет из строя.

Значение коэффициента B определяется материалом датчика и представляет собой на-

клон характеристики R/T . В уравнении (1) значение коэффициента B определено двумя точками характеристики R/T (R_T , T) и (R_N , T_N), исходя из этого:

$$B = \frac{T \times T_N}{T - T_N} \times \ln \frac{R_N}{R_T}. \quad (2)$$

Терморезистор, имея номинальное значение сопротивления при определенной температуре, как и любой резистор, может иметь отклонение $\Delta R/R_N$ (допуск), обусловленное технологией изготовления. Этот параметр дается производителем на одну точку (обычно 25 °С). Однако когда требуется высокая точность измерений в широком диапазоне температур, допуск может быть указан производителем не на сопротивление, а на температуру в гарантированном диапазоне ΔT . Соответственно, такой термистор будет измерять другие значения температур с тем же самым отклонением (точностью).

Температурный коэффициент α выражает в процентах изменение абсолютной величины сопротивления при изменении температуры на 1°. Вследствие нелинейности температурной характеристики значение температурного коэффициента зависит от величины температуры, поэтому его записывают обычно с индексом, указывающим температуру, при которой имеет место данное значение. Например, α_{293} — температурный коэффициент термистора при температуре 293. Вычисляют температурный коэффициент по формуле, вытекающей из его определения и выражения температурной характеристики:

$$\alpha = \frac{dR}{dT} \times \frac{1}{R} \times 100\%. \quad (3)$$

Сопротивление при нулевой мощности измерения — это значение сопротивления термистора, измеренное при определенной температуре под электрической нагрузкой,

настолько маленькой, что она практически не оказывает влияния на результат измерения. Если же измерительный ток будет высоким или же сопротивление термистора будет иметь низкое значение, результат измерений будет искажен из явления саморазогрева, что должно быть принято во внимание. Явление саморазогрева зависит не только от электрической нагрузки, но и от теплового коэффициента рассеяния δ_{th} и геометрических размеров датчика. Оно описывается следующим выражением:

$$P = U \times I = \delta_{th} \times (T - T_A) + C_{th} \times (dT/dt), \quad (4)$$

где P — приложенная электрическая мощность, мВт; U — мгновенное значение напряжения на терморезисторе, В; I — мгновенное значение тока, протекающего через терморезистор, мА; T — мгновенная температура терморезистора, К; T_A — температура окружающей среды, К; C_{th} — теплоемкость терморезистора, мДж/К; dT/dt — изменение температуры во времени, К/с.

Если постоянная электрическая мощность будет приложена к терморезистору, то его температура сначала незначительно увеличится, но это изменение со временем будет снижаться. А после некоторого временного промежутка будет достигнуто устойчивое состояние, при котором приложенная мощность рассеется за счет эффекта теплопроводности или конвекции. Если принять dT/dt равным нулю, а $U = R \times I$, где R — сопротивление терморезистора, соответствующее его температуре, то получим:

$$I = \sqrt{\frac{\delta_{th} \times (T - T_A)}{R(T)}}$$

или

$$U = \sqrt{\delta_{th} \times (T - T_A) \times R(T)}. \quad (5)$$

$$I = \sqrt{[\delta_{th} \times (T - T_A)] / R(T)}$$

или

$$U = \sqrt{\delta_{th} \times (T - T_A) \times R(T)}.$$

Полученные формулы являются параметрическим представлением вольт-амперной характеристики с зависимостью сопротивления терморезистора от температуры $R(T)$. Очевидным является и то, что вольт-амперная характеристика зависит от коэффициента рассеяния, который, в свою очередь, зависит от геометрических размеров датчика и среды, в которую он помещен.

Максимально допустимый ток — ток, при протекании которого через терморезистор температура последнего равна максимально допустимой. Величина допустимого тока зависит от температуры среды и ее характера. При одинаковой температуре двух сред допустимый ток будет больше в той среде, которая обладает большей теплопроводностью. Соответственно, коэффициент рассеяния, за-

висящий от параметров среды, определяет максимально допустимую мощность, рассеиваемую датчиком, помещенным в такую среду:

$$P_{max} = \delta_{th} \times (T_{max} - T_A). \quad (6)$$

Коэффициент рассеяния определяется как отношение изменения в рассеиваемой энергии к изменению температуры терморезистора. В численном виде выражается в мВт/К и служит мерой нагрузки, которая вызывает изменение температуры терморезистора на 1 К в установившемся состоянии окружающей среды:

$$\delta_{th} = dP/dT. \quad (7)$$

Для определения коэффициента рассеяния к терморезистору прикладывают нагрузку, при которой соотношение U/I соответствует значению сопротивления, измеренному при температуре $T = 85$ °С:

$$\delta_{th} = \frac{U \times I}{T - T_A} = \frac{P}{T - T_A}, \quad (8)$$

где T — температура тела терморезистора, °С; T_A — температура окружающей среды, °С.

Теплоемкость C_{th} — количество тепла, которое надо сообщить терморезистору, чтобы повысить температуру рабочего тела на один градус. Величина теплоемкости является функцией температуры, однако при температурах, не превышающих допустимой, можно принять ее постоянной и вычислять по формуле:

$$C_{th} = dH/dT = \delta_{th} \times \tau_C, \quad (9)$$

где τ_C — тепловая постоянная времени охлаждения, с.

Постоянная времени τ_C — время, в течение которого температура рабочего тела при его свободном охлаждении понижается на 63,2% от первоначальной разности температур рабочего тела и окружающей среды. Как правило, температура, до которой нагревают терморезистор, равна 85 °С, а температура среды, в которую помещают терморезистор для охлаждения, берется равной 25 °С. Соответственно, охлаждение рабочего тела терморезистора происходит тем быстрее, чем меньше его геометрические размеры.

Как и у любого радиоэлемента, материал, из которого изготовлен терморезистор, подвержен необратимому изменению характеристик (у терморезисторов это увеличение сопротивления и изменение коэффициента B). Это происходит из-за теплового перенапряжения, приводящего к дефектам кристаллической решетки, окисления незащищенных частей терморезистора, связанного с повреждением корпуса датчика, или из-за диффузии в контактных поверхностях металлизированного покрытия электродов. При низких температурах эти процессы происходят медленно, но на высоких температурах ускоряются, а со временем снижаются. Поэтому для увеличения временной стабильности параметров и уменьшения влияния изменения характеристик многие производители умышленно подвергают терморезисторы процессу старения непосредственно после изготовления.

Обзор NTC-термисторов компании Epcos

Термисторы компании Epcos изготавливаются из тщательного отобранного и протестированного сырья. Основой для изготовле-

Таблица 1. Основные характеристики NTC-термисторов Epcos

Тип	T_A , °С	R_{25} , кОм	T_{25} , °С	$\Delta R/R_{25}$, % (ΔT , К**)	P_{max} , мВт	τ_C , с	δ_{th} , мВт/К
Дисковые							
B57871 (S871)	-55/155	2,1; 10; 12; 30	25	±1; ±3; ±5	60	7,5	3,8
B57881 (S881)	-55/155	2,1; 10; 12; 30	25	±1; ±3; ±5	100	10	4
B57885 (S885)	-55/155	2,1; 10; 12; 30	25	±1; ±3; ±5	100	10	4
B57891 (S891)	-55/155	2,2; 5; 10; 20; 100	25	±1; ±3; ±5	200	15	4
Миниатюрные							
B57861 (S861)	-55/155	2; 3; 5; 10; 30; 50; 100	25	±1; ±3; ±5	60	15	1,5
B57861 (S861)	-40/100	5; 10; 30	25	±1;	60	15	1,5
B57862 (S862)	-55/155	2,8; 5; 10	25	±1; ±3; ±5	60	21	1,7
B57863 (S863)	-55/155	3; 5; 10; 30	25	(±0,2; ±0,5)	60	15	1,5
B57867 (S867)	-55/155	2; 3; 5; 10; 30; 50; 100	25	±1; ±3; ±5	60	12	1,5
B57869 (S869)	-55/155	3; 5; 10; 30	25	(±0,2; ±0,5)	60	12	1,5
Стеклянные							
B57540 (G540)	-55/250	5; 10; 20; 30; 50; 100; 230; 1400	25	±1; ±3; ±5	18	3	0,4
B57550 (G550)	-55/300	2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 230; 1400	25	±1; ±3; ±5	32	7	0,75
B57560 (G560)	-55/300	2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 230; 1400	25	±1; ±3; ±5	50	15	1,3
B57660 (G660)	-55/300	2,2; 5,4; 10,7; 49,1; 98,6; 231,4; 1388,1	25	±3; ±5	—	18	1,5
B57750 (G750)	-55/500	8	200	±3; ±5	—	18	1,5
Зонды							
B57703 (M703)	-55/125	5; 10; 30	25	±2	150	28	2,6
B57500 (M500)	-30/100	10	25	±3	60	20	3
B57500 (K500)	-30/100	10	25	±3	60	50	5
B57501 (K501)	-30/100	6,8	25	±3	60	50	5

* — параметр указан для воздушной среды.

** — параметр указан для диапазона температур от 0 до 70 °С

ни служат оксиды металлов, таких как марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк. Оксиды первоначально измельчаются до порошкообразной массы, смешиваются с пластиковыми связующими элементами и сжимаются до нужной формы. Затем их плавят для получения поликристаллического корпуса термистора. После определенного этапа тестирования термисторы подвергаются старению для получения необходимой стабильности параметров.

Компания Ersos выпускает достаточно большой ряд терморезисторов, с которым можно ознакомиться в специальном документе по выбору Selector Guide [2]. В рамках же данной статьи мы рассмотрим лишь прецизионные малогабаритные датчики (табл. 1).

Как говорилось ранее, выбор того или иного термопреобразователя чаще всего обусловлен требованиями к разрабатываемой системе контроля, поэтому основными параметрами, на которые опирается разработчик, оказываются рабочий температурный диапазон, массо-габаритные показатели, допуск на номинальное сопротивление, постоянная времени и стоимость элемента.

Нестандартный подход к стандартной характеристике NTC-термисторов

В начале статьи говорилось, что температурная зависимость сопротивления термистора точно описывается выражением (1), однако опытным путем было установлено, что эта же характеристика может быть не менее точно воспроизведена следующим полиномом:

$$r(T) = 1/(A_0T^0 + A_1T^1 + A_2T^2 + K + A_nT^n), \quad (10)$$

где $r(T)$ — сопротивление терморезистора при температуре T ; $A_0, A_1, A_2 \dots A_n$ — некие коэффициенты, зависящие лишь от свойств материалов, которые используются при в изготовлении термистора.

Казалось бы, это несколько не упрощает представление о поведении температурной характеристики термистора, а наоборот — ведет к усложнению из-за переноса температуры в знаменатель и бесконечного числа возможных коэффициентов. Но как показала обработка этой математической модели на «живых» образцах, практически любой термистор можно описать с помощью семи первых членов полинома, так как вклад последних составляющих в конечное значение сопротивления незначителен:

$$r(T) = 1/(A+BT+CT^2+DT^3+ET^4+FT^5+GT^6). \quad (11)$$

Тогда, переходя к термопроводимости, мы получим:

$$g(T) = A+BT+CT^2+DT^3+ET^4+FT^5+GT^6, \quad (12)$$

где $r(T)$ — сопротивление, кОм; $g(T)$ — проводимость, мСм.

Такая зависимость имеет ряд преимуществ перед экспоненциальной при ее использовании в целях линеаризации характеристики с помощью математического моделирования. Для наглядного представления рассмотрим применение этой зависимости на стандартной $R(T)$ характеристике терморезистора B57861 (S861) с номинальным сопротивлением 10 кОм.

Из представленных данных (табл. 2, рис. 1) видно, что разница между значениями сопротивлений, которые предоставляет производителем в виде табличной характеристики № 8016 [3], и значениями термосопротивлений, полученными с помощью математиче-

ской модели, незначительна и не превышает 0,1%, что позволяет в дальнейших математических расчетах пренебречь этими отклонениями. Коэффициенты математической модели, с помощью которых получены расчетные данные, равны:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ J \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0,030627871 \\ 1,568767459 \times 10^{-3} \\ 3,427301696 \times 10^{-5} \\ 4,802222618 \times 10^{-7} \\ 2,593915533 \times 10^{-9} \\ 2,273634922 \times 10^{-11} \\ -2,641586291 \times 10^{-14} \end{pmatrix}$$

Сразу же оговоримся, что представленные коэффициенты подходят только для указан-

Таблица 2. Характеристика терморезистора B57861 (S861)

T, °C	R, кОм	G, мСм	r(T), кОм	g(T), мСм	(R-r(T))/R×100%	(G-g(T))/G×100%
0	32,65	0,030628	32,650000	0,030628	0	0
5	25,39	0,039386	25,386991	0,039390	0,011851	-0,01185
10	19,9	0,050251	19,900000	0,050251	0	0
15	15,71	0,063654	15,713426	0,063640	-0,02181	0,021803
20	12,49	0,080064	12,493707	0,080040	-0,02968	0,029671
25	10	0,100000	10,000000	0,100000	0	0
30	8,057	0,124116	8,055621	0,124137	0,017116	-0,01712
35	6,531	0,153116	6,529683	0,153147	0,020165	-0,02017
40	5,327	0,187723	5,324529	0,187810	0,046386	-0,04641
45	4,369	0,228885	4,366844	0,228998	0,049348	-0,04937
50	3,603	0,277546	3,601256	0,277681	0,048404	-0,04843
55	2,986	0,334896	2,985694	0,334931	0,010248	-0,01025
60	2,488	0,401929	2,488000	0,401929	0	0
65	2,083	0,480077	2,083447	0,479974	-0,02146	0,021455
70	1,752	0,570776	1,752908	0,570481	-0,05183	0,0518
75	1,481	0,675219	1,481501	0,674991	-0,03383	0,033817
80	1,258	0,794913	1,257585	0,795175	0,032989	-0,033
85	1,072	0,932836	1,072000	0,932836	0	0
90	0,9177	1,089681	0,917503	1,089915	0,021467	-0,02147
95	0,7885	1,268231	0,788337	1,268493	0,020672	-0,02068
100	0,68	1,470588	0,679904	1,470796	0,014118	-0,01412
105	0,5886	1,698947	0,588513	1,699198	0,014781	-0,01478
110	0,5112	1,956182	0,511190	1,956220	0,001956	-0,00196
115	0,4454	2,245173	0,445526	2,244538	-0,02829	0,028281
120	0,3893	2,568713	0,389562	2,566985	-0,0673	0,067255
125	0,3417	2,926544	0,341700	2,926544	0	0
130	0,3009	3,323363	0,300629	3,326359	0,090063	-0,09014
135	0,2654	3,767898	0,265271	3,769730	0,048606	-0,04863
140	0,2348	4,258944	0,234735	4,260123	0,027683	-0,02769
145	0,2083	4,800768	0,208282	4,801183	0,008641	-0,00864
150	0,1853	5,396654	0,185300	5,396654	0	0
155	0,1653	6,049607	0,165275	6,050522	0,015124	-0,01513

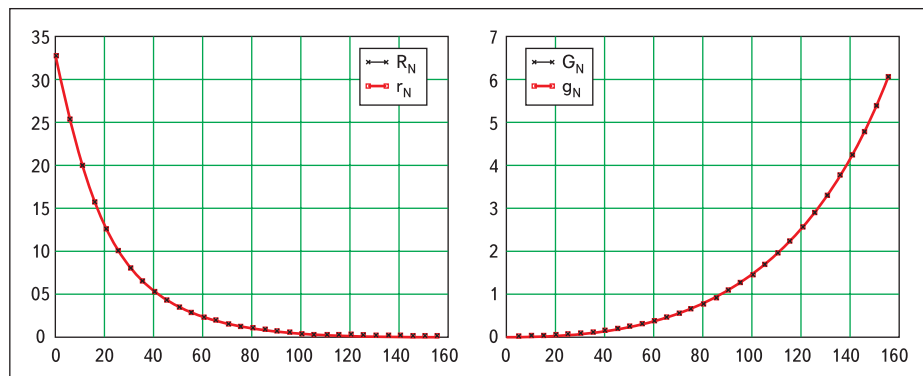


Рис. 1. Температурная зависимость терморезистора B57861 (S861)

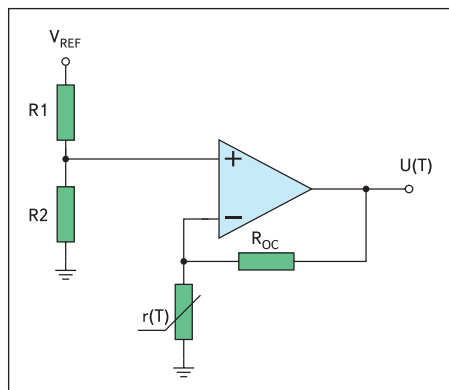


Рис. 2. Преобразователь $R(T) \rightarrow U(T)$

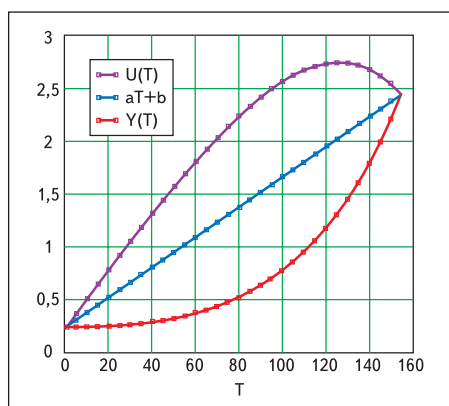


Рис. 3. Графическое представление линейризации температурной характеристики

ного температурного диапазона и табличной характеристики 8016 NTC-термисторов компании Epcos. Номинальное сопротивление терморезистора в этом случае не имеет значения. Кроме того, ограниченность температурного диапазона не обусловлена невозможностью описания с помощью математической модели, а связана с конкретным применением, для которого проводились эти расчеты.

Последующим этапом реализации практического применения полиномиального представления характеристики термосопротивления является воспроизведение зависимости (12), для чего оказалось достаточным и удобным использование операционного усилителя (ОУ) в неинвертирующей схеме включения (рис. 2).

Указанная схема будет иметь следующую выходную характеристику:

$$U(T) = \frac{U_{REF} \times R_2}{R_1 + R_2} \times \left(1 + \frac{R_{OC}}{r(T)} \right) = \frac{U_{REF} \times R_2}{R_1 + R_2} \times (1 + R_{OC} \times g(T)), \quad (13)$$

графическое построение которой представлено на рис. 3.

Масштаб координатной сетки температурной зависимости $U(T)$ можно легко менять с помощью резистора обратной связи R_{OC}

и резистивного делителя опорного напряжения U_{REF} , состоящего из резисторов R_1 и R_2 . Соответственно, преобразователь $R(T) \rightarrow U(T)$ с поставленной задачей справляется.

Линеаризация температурной характеристики NTC-термисторов

Вопрос линеаризации выходной характеристики термопреобразователя остается до сих пор открытым. Существуют методы частичной или же мнимой линеаризации, которые предлагают даже сами производители нелинейных элементов, но они не дают полного решения этой задачи.

Предлагаемый в рамках данной статьи метод, основанный на математическом моделировании, заключается в построении искусственной линейной температурной зависимости ($a \times T + b$) и последующем построении дополнительной характеристики $Y(T)$, позволяющих с помощью простых вычислений определять температуру с высокой точностью. Но из этих математических построений вытекает ряд условий, которые необходимо соблюсти для получения данных высокой точности:

1. Температурный диапазон, в котором предполагается использование датчика, должен быть четко определен.
2. Использование микроконтроллера, так как воспроизведение искусственно созданных зависимостей с помощью аналоговой электроники не возможно.
3. Использование прецизионных радиоэлементов для точного представления поведения датчика в рассматриваемом применении.

Процесс построения искусственной линейной зависимости в известном температурном диапазоне при наличии математической модели поведения терморезистора не составляет большого труда. Для этого достаточно взять две крайние точки характеристики $U(T)$ (рис. 3) и провести между ними линейный отрезок ($a \times T + b$). Получить значение коэффициентов a и b в системе уравнений:

$$\begin{cases} U(T_0) = aT_0 + b \\ U(T_N) = aT_N + b, \end{cases} \quad (14)$$

где T_0 и T_N — соответственно начальная и конечная температуры контролируемого диапазона, также не вызовет затруднений. Вспомогательную характеристику $Y(T)$ (рис. 3) получаем по следующей формуле:

$$Y(T) = 2(aT + b) - U(T). \quad (15)$$

Зависимость $Y(T)$ имеет вид отрицательной параболы, исходя из этого, зависимость $Y(T)$ можно представить следующим образом:

$$Y(T) = P_T T^2 + Q_T T + R_T, \quad (16)$$

где P_T , Q_T и R_T — постоянные коэффициенты, которые не зависят от температуры, а определяются свойствами термистора.

Приравняв выражения 15 и 16, получаем квадратное уравнение, где неизвестной величиной является температура:

$$P_T T^2 + (Q_T - 2a) \times T + (R_T + 2b + U(T)) = 0. \quad (17)$$

Корни этого квадратного уравнения находятся известным путем:

$$T_{1,2} = \frac{-(Q_T - 2a)}{2P_T} \pm \frac{\sqrt{(Q_T - 2a)^2 - 4P_T \times (R_T - 2b + U(T))}}{2P_T}. \quad (18)$$

Для нашего применения подходит только один из них, поэтому вычисление конечного значения температуры можно осуществлять по формуле:

$$T_U = \frac{(2a - Q_T) - \sqrt{(Q_T - 2a)^2 - 4P_T \times (R_T - 2b + U(T))}}{2P_T}. \quad (19)$$

Если температурный диапазон большой, а контроль температуры необходимо осуществлять с высокой точностью, то можно пойти по пути кусочной аппроксимации, и тогда коэффициенты P_T , Q_T и R_T для каждого температурного поддиапазона будут свои.

Практическое применение

Для рассмотрения представленного метода линеаризации на практике вернемся к уже известному терморезистору B57861 (S861) с номинальным сопротивлением $10 \text{ кОм} \pm 1\%$. Использование термистора предполагается в температурном диапазоне от 0 до $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Исходя из этого, номиналы резисторов для преобразователя $R(T) \rightarrow U(T)$ были взяты следующие: $R_{OC} = 1,62 \text{ кОм} \pm 0,1\%$, $R_1 = 10 \text{ кОм} \pm 0,1\%$, $R_2 = 1 \text{ кОм} \pm 0,1\%$, а опорное напряжение $U_{REF} = (2,5 \pm 0,002) \text{ В}$.

Представленные данные (табл. 3) получены путем разбиения всего температурного диапазона на 8 поддиапазонов, для которых были вычислены соответствующие коэффициенты P_T , Q_T и R_T (табл. 4).

Но даже применяя микроконтроллер, неудобно и программно неоправдано держать такое большое количество нецелочисленных коэффициентов. А переходя к аналого-цифровому преобразованию, для исключения дополнительной погрешности будет правильным в любую формулу подставлять дискрету, полученные от АЦП, а не пересчитанное значение напряжения. Поэтому конечная формула вычисления температуры для 12-битного АЦП будет выглядеть следующим образом:

Таблица 3. Пример использования метода линеаризации

T, °C	U(T), В	2(ахТ+б)-U(T), В	Y(T), В	TU, °C
0	0,2385494	0,2385494	0,2385536	0,01
5	0,2417755	0,3783175	0,3784006	5,12
10	0,2457743	0,517313	0,517313	10,00
15	0,2507038	0,6553778	0,6552907	14,92
20	0,2567421	0,7923338	0,7923338	20,00
25	0,2640909	0,9279793	0,9281112	25,08
30	0,2729777	1,0620868	1,0620867	30,00
35	0,2836586	1,1944001	1,1942603	34,94
40	0,296421	1,3246321	1,324632	40,00
45	0,3115858	1,4524616	1,452664	45,06
50	0,3295098	1,5775318	1,5775317	50,00
55	0,3505881	1,6994479	1,6992351	54,96
60	0,3752558	1,8177744	1,8177743	60,00
65	0,4039904	1,9320341	1,9323239	65,05
70	0,4373134	2,0417054	2,0417056	70,00
75	0,4757921	2,1462209	2,1459196	74,97
80	0,5200417	2,2449657	2,2449659	80,00
85	0,5707259	2,3372757	2,3376655	85,04
90	0,6285595	2,4224365	2,4224364	90,00
95	0,6943087	2,4996815	2,4992783	94,97
100	0,7687932	2,5681914	2,5681912	100,00
105	0,8528865	2,6270923	2,6275921	105,03
110	0,9475176	2,6754555	2,6754556	110,00
115	1,0536715	2,7122959	2,7117821	114,98
120	1,1723901	2,7365715	2,7365716	120,00
125	1,3047729	2,7471831	2,747798	125,01
130	1,4519775	2,7429728	2,7429722	129,99
135	1,61522	2,7227246	2,7220938	134,97
140	1,7957756	2,6851633	2,6851626	139,99
145	1,9949786	2,6289546	2,6294385	145,02
150	2,2142226	2,5527048	2,5527044	150,01
155	2,4549607	2,454961	2,4549606	155,01

Таблица 4. Расчетные значения коэффициентов P_T, Q_T и R_T

Температурный поддиапазон, °C	P _T	Q _T	R _T
От 0 до 20 вкл.	-0,0000186930	0,0280628701	0,2385535709
От 20 до 40 вкл.	-0,0000360386	0,0287772293	0,2312046035
От 40 до 60 вкл.	-0,0000632859	0,0309857039	0,1864612783
От 60 до 80 вкл.	-0,0001033536	0,0358290721	0,0401031633
От 80 до 100 вкл.	-0,0001585794	0,0447055728	-0,3165720346
От 100 до 120 вкл.	-0,0002307410	0,0591820252	-1,0426010527
От 120 до 140 вкл.	-0,0003210539	0,0809035926	-2,3486838927
От 140 до 155 вкл.	-0,0004201939	0,1086103772	-4,2844894011

$$T_U = \begin{cases} -14,337 + 2,675 \sqrt{4,5637 \Delta_U - 1754,9} & \text{if } 391 < \Delta_U \leq 421 \\ 2,475 + 1,3874 \sqrt{8,7985 \Delta_U - 3541,5} & \text{if } 421 < \Delta_U \leq 486 \\ 18,858 + 0,7901 \sqrt{15,451 \Delta_U - 6787,6} & \text{if } 486 < \Delta_U \leq 615 \\ 34,978 + 0,4838 \sqrt{25,233 \Delta_U - 12838,4} & \text{if } 615 < \Delta_U \leq 852 \\ 50,785 + 0,3153 \sqrt{38,716 \Delta_U - 24401,3} & \text{if } 852 < \Delta_U \leq 1260 \\ 66,272 + 0,2167 \sqrt{56,333 \Delta_U - 46729,8} & \text{if } 1260 < \Delta_U \leq 1921 \\ 81,458 + 0,1557 \sqrt{78,382 \Delta_U - 89312,9} & \text{if } 1921 < \Delta_U \leq 2942 \\ 95,208 + 1,19 \sqrt{1,026 \Delta_U - 1601,3} & \text{if } 2942 < \Delta_U \leq 4022, \end{cases}$$

где T_U — вычисляемое значение температуры, *if* (на английском «если») — условие использования одной из формул, Δ_U — полученные дискреты от АЦП.

Соответственно, если $\Delta_U < 391$, то значения температуры ниже 0 °C, а если $\Delta_U > 4022$, то значение температуры выше 155 °C. Ну и, рассматривая каждый поддиапазон температуры в отдельности, можно получить для

него следующие точностные характеристики (табл. 5).

Такая низкая разрешающая способность, а также ее неравномерность в интервале температур от 0 до 60 °C связана с нелинейностью выходной характеристики преобразователя $R(T) \rightarrow U(T)$.

Указанная в таблице 5 погрешность не является полной, так как она не учитывает от-

Таблица 5. Точностные характеристики поддиапазонов

Температурный поддиапазон, °C	Условная разрешающая способность, °C	Погрешность вычисления, °C
От 0 до 20 вкл.	0,65	+0,77/-0,73
От 20 до 40 вкл.	0,31	+0,39/-0,37
От 40 до 60 вкл.	0,16	+0,22/-0,2
От 60 до 80 вкл.	0,08	+0,13/-0,11
От 80 до 100 вкл.	0,05	+0,09/-0,08
От 100 до 120 вкл.	0,03	+0,06/-0,05
От 120 до 140 вкл.	0,02	+0,04/-0,05
От 140 до 155 вкл.	0,02	±0,04

Таблица 6. Погрешность системы для каждой контрольной точки

T, °C	Возможное отклонение, °C	Погрешность системы, °C		
0	1,149	-1,23	+1,80	-1,88
5	5,987	4,204	+1,64	-1,45
10	10,718	9,262	+1,37	-1,39
15	15,536	14,293	+1,19	-1,36
20	20,543	19,45	+1,19	-1,20
25	25,524	24,63	+0,83	-0,68
30	30,381	29,614	+0,69	-0,70
35	35,28	34,597	+0,59	-0,71
40	40,312	39,687	+0,62	-0,62
45	45,331	44,789	+0,49	-0,37
50	50,244	49,755	+0,40	-0,40
55	55,181	54,725	+0,34	-0,43
60	60,217	59,783	+0,38	-0,38
65	65,245	64,848	+0,33	-0,23
70	70,187	69,813	+0,27	-0,27
75	75,144	74,783	+0,22	-0,30
80	80,178	79,822	+0,26	-0,26
85	85,205	84,867	+0,26	-0,18
90	90,164	89,835	+0,21	-0,22
95	95,134	94,808	+0,18	-0,24
100	100,164	99,836	+0,21	-0,21
105	105,188	104,868	+0,22	-0,16
110	110,159	109,841	+0,19	-0,19
115	115,137	114,818	+0,17	-0,21
120	120,162	119,838	+0,19	-0,19
125	125,183	124,861	+0,20	-0,16
130	130,161	129,839	+0,18	-0,18
135	135,145	134,818	+0,17	-0,20
140	140,167	139,833	+0,19	-0,19
145	145,179	144,845	+0,20	-0,18
150	150,169	149,831	+0,19	-0,19
155	155,172	154,828	+0,19	-0,19

клонение сопротивления резисторов и опорного напряжения от номинальных значений. В таблице 6 представлены возможное отклонение истинной вычисленной температуры от истинного значения и погрешность системы без учета допустимого отклонения термосопротивлений от величин, предоставленных производителем в качестве стандартной температурной характеристики № 8016.

В начале статьи говорилось, что терморезистор, как и любой резистор, имеет отклонение $\Delta R/R_N$ от номинального значения сопротивления, обусловленное технологией изготовления, и что этот параметр дается производителем на точку 25 °C. Однако, в отличие от простых резисторов, эта величина у терморезистора во всем температурном диапазоне не одинакова, и что еще важнее — она увеличивается. Компания Ерсос для упрощения вычислений и исключения необходимости самостоятельного определения отклонений в нужном температурном диа-

Таблица 7. Отклонения для терморезистора B5786 1S0103F040

T, °C	R _N , кОм	R _{МИН} , Ом	R _{МАК} , Ом	±ΔR/R _N , %	±ΔT, К
0	32650	31907	33393	2,3	0,4
5	25388	24877	25898	2	0,4
10	19900	19550	20250	1,8	0,4
15	15708	15470	15946	1,5	0,3
20	12490	12330	12650	1,3	0,3
25	10000	9900	10100	1	0,2
30	8057	7955	8159	1,3	0,3
35	6531	6434	6628	1,5	0,4
40	5327	5237	5417	1,7	0,4
45	4369	4286	4451	1,9	0,5
50	3603	3528	3678	2,1	0,5
55	2986	2918	3054	2,3	0,6
60	2488	2427	2549	2,5	0,7
65	2083	2028	2138	2,6	0,8
70	1752	1703	1801	2,8	0,8
75	1481	1437	1525	3	0,9
80	1258	1219	1297	3,1	1
85	1072	1037	1108	3,3	1
90	917,7	886,1	949,3	3,4	1,1
95	788,5	760,2	816,9	3,6	1,2
100	680,0	654,6	705,4	3,7	1,3
105	588,6	565,8	611,4	3,9	1,4
110	511,2	490,7	531,7	4	1,4
115	445,4	426,9	463,9	4,2	1,5
120	389,3	372,6	406,0	4,3	1,6
125	341,7	326,6	356,8	4,4	1,7
130	300,9	287,3	314,5	4,5	1,8
135	265,4	253,1	277,8	4,7	1,9
140	234,8	223,6	246,0	4,8	2
145	208,3	198,1	218,5	4,9	2,1
150	185,3	176,0	194,6	5	2,2
155	165,3	156,9	173,8	5,1	2,3

Таблица 8. Абсолютная погрешность измерительной системы для каждой контрольной точки

T, °C	Абсолютная погрешность, °C	
0	+2,2	-2,3
5	+2,1	-1,8
10	+1,8	-1,8
15	+1,5	-1,7
20	+1,5	-1,5
25	+1,1	-0,9
30	+1,0	-1,0
35	+1,0	-1,1
40	+1,0	-1,0
45	+1,0	-0,9
50	+0,9	-0,9
55	+1,0	-1,0
60	+1,1	-1,1
65	+1,1	-1,1
70	+1,1	-1,1
75	+1,2	-1,2
80	+1,3	-1,3
85	+1,3	-1,2
90	+1,3	-1,3
95	+1,4	-1,4
100	+1,5	-1,5
105	+1,6	-1,6
110	+1,6	-1,6
115	+1,7	-1,7
120	+1,8	-1,8
125	+1,9	-1,9
130	+2,0	-2,0
135	+2,1	-2,1
140	+2,2	-2,2
145	+2,3	-2,3
150	+2,4	-2,4
155	+2,5	-2,5

Таблица 9. Поправка на саморазогрев для терморезистора B5786 1S0103F040

T, °C	Поправка, °C
0	0,001
5	0,001
10	0,002
15	0,002
20	0,003
25	0,003
30	0,004
35	0,005
40	0,006
45	0,008
50	0,01
55	0,012
60	0,014
65	0,017
70	0,02
75	0,023
80	0,027
85	0,032
90	0,038
95	0,044
100	0,051
105	0,059
110	0,067
115	0,077
120	0,088
125	0,101
130	0,115
135	0,13
140	0,147
145	0,165
150	0,186
155	0,208

пазоне предоставляет программу “NTC R/T Calculation” [4], которая позволяет в автоматическом режиме проводить все необходимые расчеты по определению отклонений сопротивления и температуры.

Исходя из данных таблицы 7, можно считать тотальную погрешность рассмотренной измерительной системы с учетом всех отклонений и допусков от соответствующих номинальных значений, ошибки

АЦП и расчетов математической модели (табл. 8).

Поправка на саморазогрев термистора

При работе в любой электрической схеме через терморезистор протекает измерительный ток, если его величина будет более 100 мкА или же сопротивление термистора будет иметь небольшую величину, то результат измерений искажается. Это явление называется саморазогревом и, как было сказано ранее, зависит не только от нагрузки, но и от применяемых материалов и конструкции датчика. Говоря другими словами, на полученный результат измерений необходимо делать поправку, вычисление которой можно проводить по следующей формуле:

$$T_A = T - \frac{U^2}{\delta_{th} \times R(T)} = T - \frac{I^2 \times R(T)}{\delta_{th}}, \quad (20)$$

где T_A — действительно значение контролируемой температуры; T — измеренное значение температуры; U — мгновенное значение напряжения на терморезисторе, I — мгновенное значение тока, протекающего через терморезистор; $R(T)$ — значение сопротивления терморезистора, соответствующее температуре T ; δ_{th} — коэффициент теплового рассеяния.

Применительно к используемой схеме и при условии использования микроконтроллера с 12-битным АЦП выражение (20) будет выглядеть следующим образом:

$$T_A = T_U - \frac{U_{REF}^2 \times R_2 \times \left[\frac{\Delta U}{4096} \times (R_1 + R_2) - R_2 \right]}{\delta_{th} \times R_{OC} \times (R_1 + R_2)^2}$$

В примененной схеме включения (рис. 2) величина поправки будет тем меньше, чем больше значение резистора в обратной связи операционного усилителя R_{OC} . Следует отметить, что полученные значения поправки для температуры (табл. 9) справедливы только для указанных термисторов, преобразователя $R(T) \rightarrow U(T)$, а также для значения коэффициента рассеяния в воздухе, равного 1,5 мВт/К. При применении термистора в любой другой среде необходимо определять значение этого коэффициента опытным путем.

Заключение

Применение термисторов с отрицательным ТКС в качестве датчиков температуры имеет определенные ограничения, связанные с точностью и погрешностью измерений, но при использовании предложенного в рамках данной статьи метода такое применение возможно. Полученные на конкретном примере значения не являются обобщающими для всех терморезисторов, а введение неболь-

ших доработок в преобразователь позволяет увеличить точностные показатели измерительной системы в целом в 2–3 раза. ■

Литература

1. http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/NonlinearResistors/NTCThermistors/PDF/PDF_General_technical_information,property=Data_en.pdf;PDF_General_technical_information.pdf
2. http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/NonlinearResistors/NTCThermistors/PDF/PDF_SelectorGuide,property=Data_en.pdf;PDF_SelectorGuide.pdf
3. http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/NonlinearResistors/NTCThermistors/PDF/PDF_Standardized,property=Data_en.pdf;PDF_Standardized.pdf
4. http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/DesignTools/NTCThermistors/Page_License2,locale=en.html