

Популярные контактные технологии термометрии

Михаил ПУШКАРЕВ
pmm@midaus.com

Измерение температуры — один из наиболее распространенных видов измерений в нашей жизни. Каждое утро мы смотрим на термометр за окном, не задумываясь, как он работает, а заболев, пользуемся медицинским термометром.

Наиболее просто измерения температуры реализуются в области умеренных температур в газообразных и жидких средах при стационарных температурах. Измерение температуры поверхности объектов существенно сложнее, чаще не столько в смысле практической реализации, сколько в плане получения достоверных результатов. Непросто измерить и быстро меняющуюся температуру. Сложными являются измерения в области либо крайне низких, либо сверхвысоких температур, и измерения температуры с высокой точностью.

К сожалению, одним из результатов проводимых реформ явилось нарушение преемственности между поколениями разработчиков. Нередко в Интернет-форумах можно встретить такой «простой» вопрос: «Как измерить температуру с точностью 0,1 °C?», — и не менее наивный ответ: «Возьмите датчик TMP100, у него разрешающая способность 0,0625 °C». При этом отождествляются понятия разрешающей способности АЦП и точности измерительного устройства, и совершенно не учитывается необходимость наличия дорогостоящего испытательного оборудования, к примеру, эталонного платинового термопреобразователя сопротивления ценой 30 000 рублей или \$5000, без которого невозможна калибровка устройства.

Квалифицированно решить задачу создания измерительного устройства в области термометрии, в том числе и частную задачу по конструированию устройства обработки сигнала первичного преобразователя, можно только изучив основы термометрии, хорошо изложенные в [1, 2]. Здесь и далее понятия из области метрологии соответствуют [3]. Хорошим подспорьем будут материалы семинара Analog Devices [4], перевод которого можно найти на сайте www.w.autex.ru/lib.ht.ml.

Вся термометрия основана на изменении того или иного свойства вещества с изменением температуры. Многообразие этих свойств предполагает и многообразие способов измерения температуры. Свойство вещества изменять свой объем с изменением температуры и основанный на этом эффекте жидкостный термометр

знакомы каждому со школьных лет. О ядерном квадрупольном резонансном термометре знает только узкий круг специалистов.

Для удобства воспроизведения температурной шкалы используется Международная практическая температурная шкала (МПТШ), основанная на нескольких постоянных и воспроизводимых температурах фазовых равновесий — реперных точках, которым присвоены определенные числовые значения, явившиеся результатом проведения множества измерений. Первая МПТШ была принята в 1928 году, затем неоднократно уточнялась. О сложностях, встретившихся при этом, в том числе и о сложности измерения температуры с высокой точностью, говорит, к примеру, тот факт, что различия между МПТШ-68 и МПТШ-48 в области высоких температур достигают нескольких градусов. В настоящее время действует МПТШ-90 (ITS-90), включающая в себя семнадцать реперных точек в диапазоне температур от –270,15 °C до +1084,62 °C.

Для применения в технике удобны способы измерения температуры, в которых температура преобразуется в электрический сигнал того или иного вида. Далее мы рассмотрим наиболее употребительные из этих способов и используемые при этом физические эффекты в применении к контактному измерению температуры, когда первичный преобразователь находится в непосредственном контакте с объектом измерения.

Зависимость электрического сопротивления проводников от температуры (терморезистивный эффект), открытая в 1827 году немецким физиком Омом, лежит в основе измерения температуры с использованием термопреобразователей сопротивления и терморезисторов.

В 1821 году немецкий физик Зеебек открыл явление термоэлектричества — возникновение термо-ЭДС в контакте разнородных материалов при наличии разности температур. С использованием этого эффекта работают термопары.

Зависимость контактной разности потенциалов в полупроводниковом *p-n*-переходе

от температуры используется в полупроводниковых датчиках температуры. Строго говоря, к полупроводниковым датчикам следует отнести и большинство терморезисторов, и классификация получается достаточно условной.

На зависимости частоты механического резонанса кристалла от температуры основаны кварцевые термометры.

Выбор первичного преобразователя и конкретная конструктивная реализация устройства для измерения температуры определяются требуемыми метрологическими характеристиками и условиями эксплуатации, такими как:

- диапазон измеряемых температур;
- максимально допустимая погрешность измерения;
- состав и свойства измеряемой среды;
- долговременная стабильность;
- тепловая инерционность;
- срок службы;
- межповерочный интервал;
- механические воздействия, как на первичный преобразователь, так и на иные составные части устройства;
- диапазон рабочих температур вторичных приборов;
- расстояние между первичным преобразователем и вторичными приборами;
- электромагнитная обстановка в предполагаемом месте применения.

Термопреобразователи сопротивления (термометры сопротивления, Resistive Temperature Devices RTDs).

Эти термины исторически закрепились за измерительными преобразователями на основе терморезистивного эффекта, изготовленными из чистых металлов, имеющих положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Металлы имеют достаточно простую зависимость удельного сопротивления от температуры, легко описываемую аналитически. Массовое распространение получили термопреобразователи сопротивления (ТС) на основе платины, меди и никеля, характеристики которых приведены в таблице 1. Зависимость сопротивления ТС от температуры описывается номи-

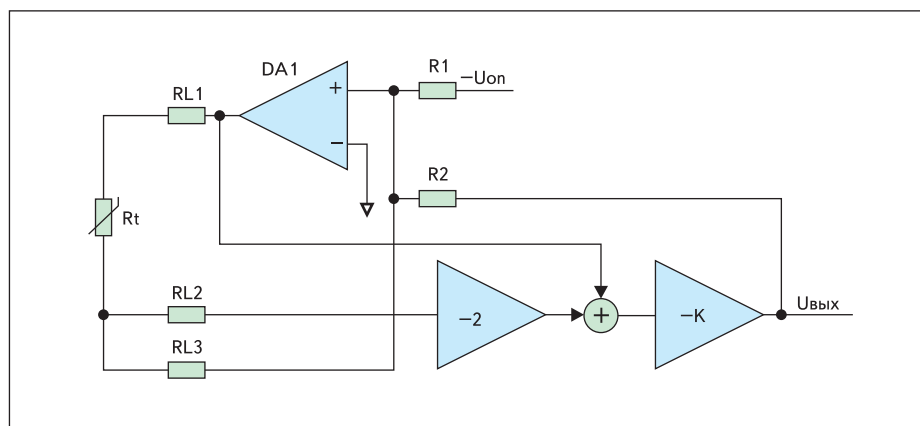


Рис. 1. Схема подключения ТС, исключающая влияние сопротивления соединительных проводов

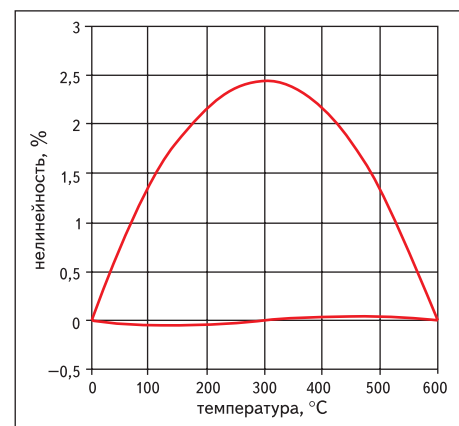


Рис. 2. Нелинейность характеристики платинового ТС

противления от температуры, однако, наряду с никелевыми, имеют существенно более узкий температурный диапазон и худшую стабильность из-за невысокой стойкости к окислению. Термопреобразователи, предназначенные для применения в сложных условиях эксплуатации, как правило, имеют защитную арматуру и относительно большие размеры и большей частью изготавливаются по традиционной технологии с проволоочным чувствительным элементом.

Сведения о большинстве отечественных изготовителей первичных преобразователей и датчиков температуры на их основе можно найти на сайте www.world.ru/support/sgsns.htm.

Фирмами Heraeus Sensor Technology, Honeywell выпускается большая номенклатура платиновых тонкопленочных ТС, в том числе и миниатюрных, характеристики которых представлены в таблице 2.

Из курса электротехники известны двухпроводная и четырехпроводная схемы измерения сопротивления. В практике использования термопреобразователей сопротивления наиболее распространена трехпроводная схема подключения. В случае удаленного размещения первичного преобразователя сопротивление подключающих проводов и его изменение с изменением температуры окружающей среды вносят неконтролируемую дополнительную погрешность.

Схема, теоретически позволяющая исключить влияние сопротивления подключающих проводов и его изменения с температурой, приведена на рис. 1. Ток через термопреобразователь сопротивления R_t обеспечивается источником тока на операционном усилителе DA1. Падение напряжения на проводе RL3 усиливается с коэффициентом усиления -2 , а затем суммируется с падением напряжения на сумме сопротивлений RL1, R_t и RL3. При равенстве сопротивлений проводов $RL1 = RL3$ (что просто реализовать практически, отрезав два провода одинаковой длины из одной бухты) выходное напряжение сумматора равно падению напряжения на R_t . Сигнал с выхода сумматора усиливается

усилителем с коэффициентом усиления $-K$. Через резистор R2 в схеме реализована линеаризация характеристики ТС. Такое решение с изменением питания первичного преобразователя часто используется при зависимости его функции преобразования, близкой к квадратичной. На рис. 2 показаны графики нелинейности характеристики платинового ТС в диапазоне температур от 0 до +600 °C без коррекции нелинейности и с коррекцией, построенные по значениям НСХ. Нелинейность передаточной характеристики схемы до коррекции 2,43%, после коррекции — 0,046%. Передаточная характеристика схемы по полезному сигналу описывается выражением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{K \times R2 \times R}{R1 \times (R2 - K \times R1)},$$

а оптимальная коррекция нелинейности достигается при сопротивлении резистора R2, определяемом по формуле

$$R2 = \frac{K \times (R_{t1} \times R_{t2} + R_{t2} \times R_{t3} - 2 \times R_{t1} \times R_{t3})}{2 \times R_{t2} - R_{t1} - R_{t3}},$$

где R_{t1} , R_{t2} , R_{t3} — сопротивление ТС при нижней, средней и верхней температурах рабочего диапазона температур соответственно.

Если в измерительной схеме используются АЦП и микроконтроллер, коррекция нелинейности реализуется программно, по НСХ преобразователя, записанной в память микроконтроллера в виде таблицы или коэффициентов соответствующего аппроксимирующего полинома. Такая схема, позволяющая, как и предыдущая, скорректировать влияние сопротивления подключающих проводов, показана на рис. 3. Последовательным измерением напряжения на входах AIN1 и AIN2 с последующим вычитанием из результата второго измерения удвоенного результата первого измерения получим значение напряжения непосредственно на ТС при условии, что сопро-

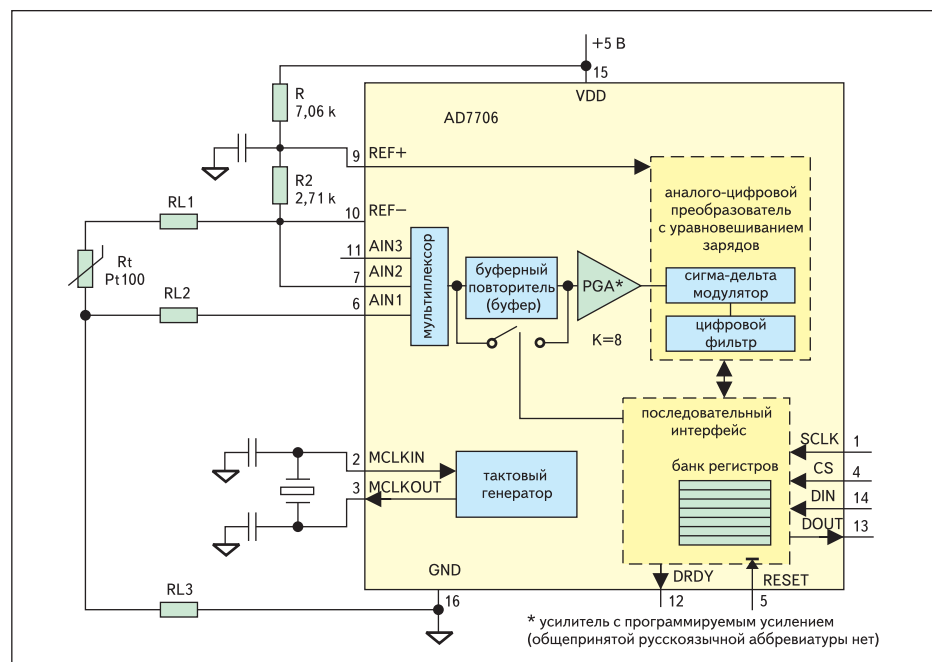
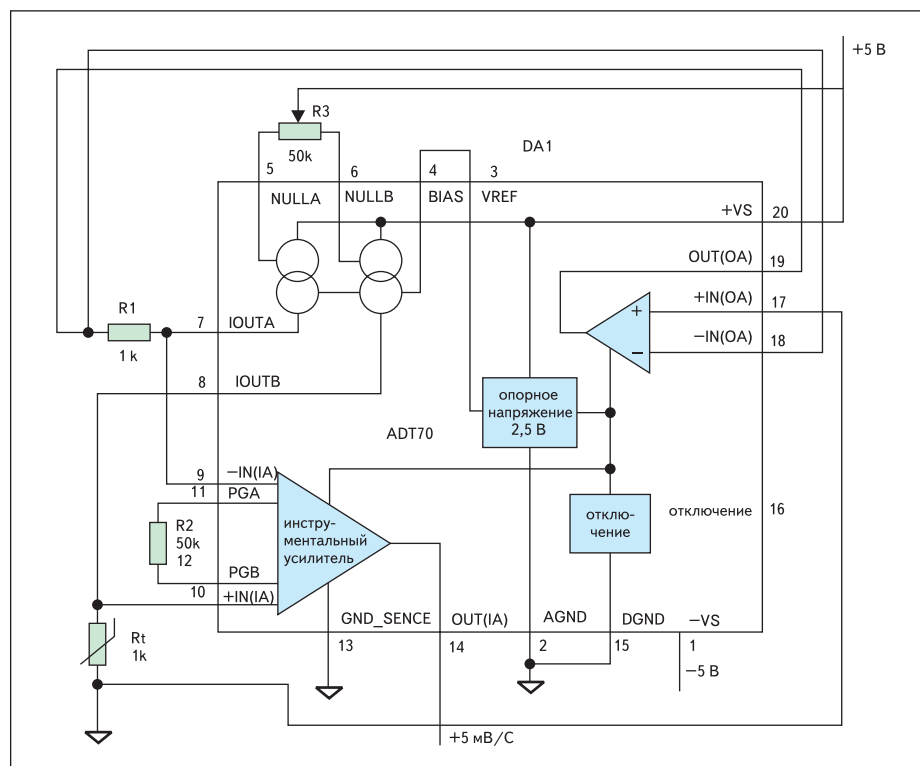


Рис. 3. Схема подключения ТС к АЦП



тивления проводов RL1 и RL3 равны. В схеме реализован логотрический метод измерения напряжений, когда опорное напряжение, снимаемое с резистора R2, отслеживает изменение тока через ТС, при этом от источника питания не требуется особой стабильности.

Специализированные микросхемы XTR108, XTR112, XTR114 (Texas Instruments) предназначены для применения в датчиках температуры с унифицированным выходным сигналом 4–20 мА. Микросхема XTR108 — интеллектуальный программируемый преобразователь для использования с температурными или мостовыми первичными преобразователями. Установки «нуля», «диапазона» и линеаризация аналогового тракта датчика обеспечиваются через последовательный цифровой интерфейс. XTR112 и XTR114 — аналоговые схемы, позволяющие корректировать нелинейность первичного преобразователя, и различающиеся значениями источников тока (2 по 250 мкА и 2 по 100 мкА соответственно), могут использоваться и с удаленным первичным преобразователем с трехпроводным подключением.

Для работы с ТС с номинальным сопротивлением до 1 кОм предназначена микросхема ADI70 (Analog Devices). Максимальный диапазон измеряемых температур $-200 \dots +1000$ °C. Один из возможных вариантов схемы с использованием четырехпроводного подключения ТС показан на рис. 4. Учитывая, что ток питания преобразователя равен 0,9 мА, использование миниатюрных ТС с номинальным сопротивлением 1 кОм может вызвать их перегрев рабочим током.

При необходимости особо точных измерений температуры следует учитывать саморазогрев ТС рабочим током. К примеру, для термопреобразователя ТО-92 (Heraeus) с номинальным сопротивлением 100 Ом, находящегося в спокойном воздухе, при максимально допустимом токе 1 мА дополнительная погрешность составит 0,065 °С.

Нелишним будет еще раз напомнить, что все элементы схемы измерительного устройства, определяющие ее передаточную характеристику, должны быть прецизионными. Качественные характеристики компонентов определяются требуемыми метрологическими характеристиками устройства.

Терморезисторы на основе полупроводников имеют ТКС, на один-два порядка больший, чем у металлических термопреобразователей сопротивления.

Термисторы (Thermistors) — полупроводниковые резисторы с отрицательным ТКС, изготавливаемые на основе смеси окислов металлов переходной группы (от титана до меди). Выбором процентного соотношения компонентов и технологических режимов достигается получение необходимых значений удельного сопротивления и ТКС. Первая партия термисторов была выпущена фирмой General Motors в 1948 году.

Для термисторов характерны большая нелинейность характеристики, относительно большой разброс номинального сопротивления и ТКС, не слишком высокая стабильность. Несомненное достоинство термисторов — их невысокая стоимость, что наряду с надежностью до сих пор обеспечивает их

применение в устройствах, не требующих высокой точности измерений. Большое значение номинального сопротивления при большой чувствительности позволяет не учитывать сопротивления подключающих проводов. Конструкции термисторов разнообразны, удовлетворяют различным условиям эксплуатации. Из-за их небольших размеров они имеют малую тепловую инерцию. Особенно хорош этот показатель у терморезисторов бусиновой конструкции, которые к тому же отличаются устойчивостью к воздействию неблагоприятных факторов измеряемой среды. Диапазон рабочих температур термисторов –100...300 °С, хотя отдельные высокотемпературные модификации работают вплоть до +1200 °С.

Аналитически зависимость сопротивления термистора от температуры описывается выражением

$$R = A \times e^{B/T},$$

где A и B — константы, определяемые свойствами полупроводникового материала.

Изготовители в справочных данных указывают номинальное сопротивление при определенной температуре (обычно $+20^{\circ}\text{C}$ или $+25^{\circ}\text{C}$) и значение постоянной B .

Термисторы на основе медно-марганцевых (серии ММТ и СТ2), кобальто-марганцевых (КМТ и СТ1) и медно-кобальто-марганцевых (СТ3) окисных полупроводников выпускает ОАО «Алмаз». Тайваньская фирма Sensera производит 4 серии термисторов (НТ, НАТ, миниатюрные ТS и для поверхностного монтажа СТ) с рабочим диапазоном температур $-50...+100$ °С. Свыше тридцати типов термисторов в различных конструктивных исполнениях для целей измерения и регулирования температуры изготавливает Еrcos. Две серии термисторов (NTSA0 и NTSD0) выпускает Murata.

Простыми схемами, приведенными на рис. 5, можно уменьшить нелинейность характеристики термистора до приемлемых значений. К примеру, погрешность нелинейности для термистора NTSA0XR502 (Murata) с номинальным сопротивлением 5 кОм с линеаризацией в диапазоне температур +30...+90 °C

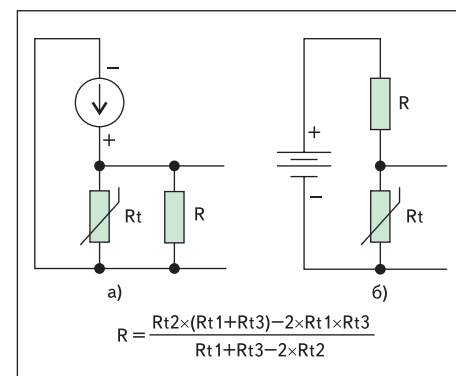


Рис. 5. Схемы линейризации характеристик термисторов

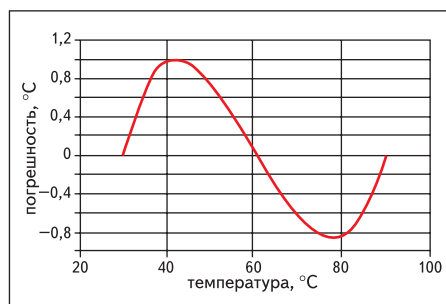


Рис. 6. Погрешность нелинейности характеристики термистора после линейаризации

при сопротивлении резистора R, равном 965 Ом, не превышает $\pm 1^\circ\text{C}$, что показано на рис. 6. Такое решение вполне приемлемо, например, в схеме управления нагревом воды в баке стиральной машины.

Фирмой Maxim производятся специализированные микросхемы MAX6682 и MAX6691 для измерения температуры с применением термисторов с номинальным сопротивлением 10 кОм. Микросхема MAX6682 имеет встроенный 10-разрядный АЦП, предназначена для измерения температуры в диапазоне $0...+50^\circ\text{C}$ с погрешностью не хуже $\pm 1,5^\circ\text{C}$, которая определяется в основном погрешностью линейаризации характеристики термистора. Микросхема MAX6691 — четырехканальный преобразователь температуры с ШИМ. Линейаризация обеспечивается одновременно для всех четырех термисторов. Основное назначение микросхем — бытовая техника и медицинское оборудование.

Позисторы (Posistors) — это терморезисторы с большим положительным ТКС. Характеристика позистора имеет относительно линейный участок в диапазоне температур, не превышающем нескольких градусов. По этой причине позисторы непригодны для измерения температуры и используются в основном как пороговые элементы.

Кремниевые резистивные датчики температуры (Silicon Temperature Sensors) изготавливаются по технологии, аналогичной технологии интегральных схем, что обеспечивает им отличную долговременную стабильность. Физически используется метод измерения так называемого «сопротивления растекания», величина которого зависит только от удельного сопротивления материала и площади контакта. Кристалл не имеет *p-n*-переходов и очень прост конструктивно. Датчики имеют большой положительный ТКС, определяемый в основном значением удельного сопротивления используемого материала, и заметно меньшую в сравнении с термисторами нелинейность характеристики.

Датчики серий KT100, KT110, KT130, KT210, KT230, KTY10, KTY11, KTY13, KTY16, KTY19, KTY21, KTY23 (Infineon Technologies) имеют рабочий диапазон температур $-50...+150^\circ\text{C}$, различное конструктивное исполнение (от корпуса SOT23 для поверхностного мон-

тажа до специальных корпусов из никеля и нержавеющей стали). Среднее значение номинального сопротивления RA в зависимости от типа равно 1 кОм или 2 кОм, оно зависит от протекающего тока из-за эффекта саморазогрева. Рекомендуемое значение рабочего тока — 1 мА. В диапазоне температур $-30...+130^\circ\text{C}$ зависимость сопротивления от температуры описывается выражением

$$R_T = R_{25}(1 + \alpha \times \Delta T_A + \beta \times \Delta T_A^2),$$

где $\alpha = 7,88 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\beta = 1,937 \times 10^{-5} \text{ K}^2$.

Температурный коэффициент, характеризующий изменение сопротивления с температурой относительно номинального значения:

$$k_T = \frac{R_T}{R_{25}} = 1 + \alpha \times \Delta T_A + \beta \times \Delta T_A^2.$$

Кремниевые резистивные датчики температуры серий KTY81–KTY84 с номинальными значениями сопротивления 1 кОм и 2 кОм выпускаются фирмой Philips Semiconductors в корпусах SOD68, SOD70 и SOT23. Диапазон рабочих температур $-55...+150^\circ\text{C}$ — для KTY81, KTY82, $-55...+175^\circ\text{C}$ — для KTY83 и $-40...+300^\circ\text{C}$ — для KTY84.

Нелинейность характеристики кремниевых резистивных датчиков корректируется теми же способами, что и для термисторов.

Преобразователи термоэлектрические (термопары, Thermocouples).

Для распространенных типов термопар путем многократных опытов с термопарами, изготовленными из высококачественных материалов, были определены номинальные статические характеристики преобразования (НСХ), в табличном виде представляющие зависимость термо-ЭДС термопары от температуры при температуре свободного конца, равной 0°C . На основе этих табличных значений рассчитаны коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимости термо-ЭДС от температуры, при этом для разных участков рабочего диапазона температур эти коэффициенты зачастую различны, поскольку для некоторых типов термопар зависимость термо-ЭДС от температуры (первая производная от термо-ЭДС) имеет сложный характер, что видно из рис. 7. Классификация наиболее употребительных термопар приведена в [6], а номинальные статические характеристики и коэффициенты полиномиальной аппроксимации нормированы стандартом [7].

Практически используемые в массовых измерениях термопары, естественно, имеют отклонения от НСХ, и разделяются по допустимому отклонению от НСХ на классы. На концах допустимого диапазона рабочих температур отклонение от НСХ (основная абсолютная погрешность измерения) может достигать нескольких градусов. Характеристики термопар распространенных типов приведены в таблице 3.

Измерение термо-ЭДС термопары с минимальными инструментальными погрешностями обеспечивается в классическом компенсационном методе, когда две одинаковых термопары без компенсационных проводов включены встречно-последовательно, холодный спай имеет температуру тройной точки воды, а свободные концы подключены к потенциометру. Такой метод совершенно неприемлем для оперативного контроля и регулирования температуры.

Распространен метод измерения с компенсацией температуры свободных концов термопары с применением интегральных датчиков температуры с потенциальным выходным сигналом, таких как TMP35, LM35, LM45, LM135. С помощью внешнего делителя изменение выходного напряжения датчика с температурой окружающей среды приводится к усредненному значению чувствительности конкретного типа термопары в диапазоне рабочих температур измерительного устройства, обычно от 0 до $+50^\circ\text{C}$. Полученное напряжение суммируется с напряжением, вырабатываемым термопарой и дополнительным напряжением, что позволяет получить выходной сигнал схемы, эквивалентный НСХ соответствующей термопары. Одна из возможных схем компенсации температуры свободных концов показана на рис. 8. Регулировкой резистора R1 изменение с температурой напряжения на резисторе R3 подстраивается к значению чувствительности термопары, а регулировкой резистора R2 выходное напряжение устанавливается равным термо-ЭДС соответствующей термопары при фактической температуре окружающей среды.

Специализированные микросхемы AD594, AD595, AD596, AD597 (Analog Devices), предназначенные для применения с термопарами, обеспечивают наряду с компенсацией температуры свободных концов термопары и требуемое усиление сигнала. Микросхемы

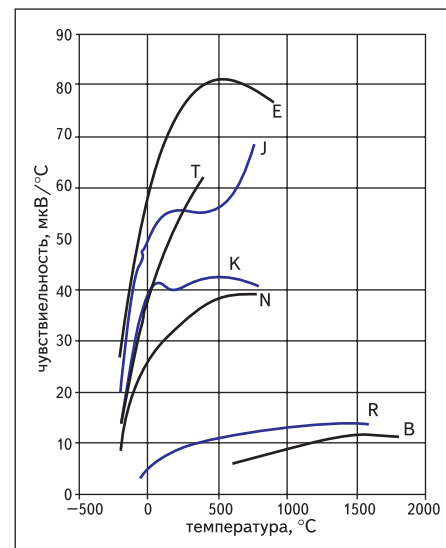
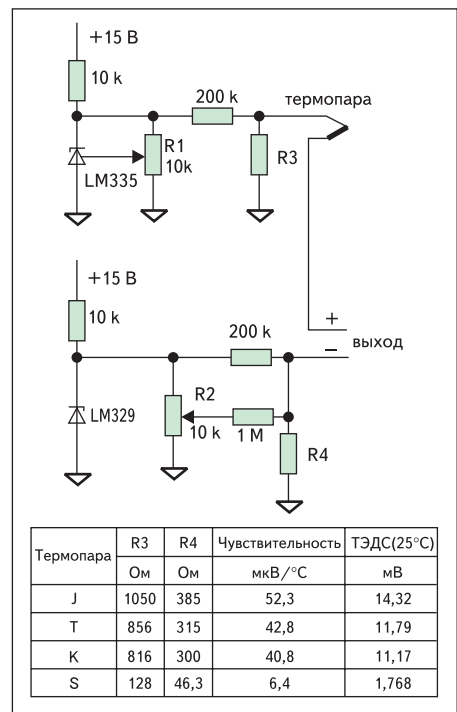


Рис. 7. Зависимости чувствительности термопар от температуры

Тип по ГОСТ	Обозначение по ГОСТ	Обозначение по ANSI	Материал термоэлектродов		Диапазон рабочих температур, °C	Класс	Чувствительность, мкВ/°C	Предельно допустимое отклонение ТЭДС от HСХ, °C
			положительного	отрицательного				
ТВР	A-1		вольфрам-рений W-Re (5% Re)	вольфрам-рений W-Re (20% Re)	от 1000 до +2200 (+2500)	3	13—16	0,007t
	A-2				2	12—16	0,005t	
	A-3							
ТПР	B	B	платина-родий Pt-Rh (30% Rh)	платина-родий Pt-Rh (6% Rh)	от +600 до +1700 (+1800)	3	5,9—11,7	4,0 (от +600 до +800 °C); 0,005t (от +800 до +1800 °C)
					2	0,0025t (от +600 до +800 °C)		
ТПП10	S	S	платина-родий Pt-Rh (10% Rh)	платина Pt	от 0 до +1300 (+1600)	2	5,4—12,1	1,5 (от 0 до +600 °C); 0,0025t (от +600 до +1600 °C)
					1	1,0 (от 0 до +1100 °C); 1+0,003(t-1100) (от +1100 до +1600 °C)		
ТПП13	R	R	платина-родий Pt-Rh (13% Rh)	платина Pt	от 0 до +1300 (+1600)	2	5,4—14,1	1,5 (от 0 °C до +600 °C); 0,0025t (от +600 до +1600 °C)
					1	1,0 (от 0 до +1100 °C); 1+0,003(t-1100) (от +1100 до +1600 °C)		
ТХА	K	K	хромель Ni-Cr (9,5% Cr)	алюмель Ni-Al (5,5% Al, Si, Mn, Co)	от -200 до +600 (+800)	3	15,5—42,6	0,015t (от -250 до -167 °C); 2,5 (от -167 до +40 °C)
					2	2,5 (от -40 до +333 °C); 0,0075t (от +333 до +1300 °C)		
					1	1,5 (от -40 до +375 °C); 0,004t (от +375 до +1300 °C)		
ТХКн	E	E	хромель Ni-Cr (9,5% Cr)	константан Cu-Ni (45% Ni, Mn, Fe)	от -200 до +700 (+900)	3	25,6—81	0,015t (от -200 до -167 °C); 2,5 (от -167 до +40 °C)
					2	2,5 (от -40 до +333 °C); 0,0075t (от +333 до +900 °C)		
					1	1,5 (от -40 до +375 °C); 0,004t (от +375 до +800 °C)		
ТХК	L		хромель Ni-Cr (9,5% Cr)	копель Cu-Ni (44% Ni)	от -200 до +750 (+800)	3	31,2—88,6	1,5+0,01t (от -200 до -100 °C); 2,5 (от -100 до +100 °C)
					2	2,5 (от -40 до +360 °C); 0,7+0,005t (от +360 до +800 °C)		
ТМКн	T	T	медь Cu	константан Cu-Ni (45% Ni)	от -200 до +350 (+400)	3	15,8—62	0,015t (от -200 до -66 °C); 1,0 (от -66 до +40 °C)
					2	1,0 (от -40 до +135 °C); 0,0075t (от +135 до +400 °C)		
					1	0,5 (от -40 до +125 °C); 0,004t (от +125 до +350 °C)		
ТНН	N	N	нихросил Ni-Cr-Si (14,2% Cr; 1,4% Si)	нисил Ni-Si-Mg (4,4% Si; Fe, C, Mg)	от -200 до +600 (+800)	3	9,6—39,3	0,015t (от -250 до -167 °C); 2,5 (от -167 до +40 °C)
					2	2,5 (от -40 до +333 °C); 0,0075t (от +333 до +1300 °C)		
					1	1,5 (от -40 до 375 °C); 0,004t (от +375 до +1300 °C)		
ТЖК	J	J	железо Fe	константан Cu-Ni (45% Ni, Mn, Fe)	от -200 до +750 (+900)	2	22—64,1	2,5 (от 0 до +333 °C); 0,0075t (от +333 до +900 °C)
					1	1,5 (от -40 до +375 °C); 0,004t (от +375 до +750 °C)		
ТМК	M		медь Cu	копель Cu-Ni (44% Ni)	от -200 до +100	—	19—51	1,3+0,001t (от -200 до 0 °C); 1,0 (от 0 до +100 °C)

Микросхема LT1025 (Linear Technology) предназначена для компенсации температуры свободных концов термопар типов E, J, K, T, R, S. В дополнение к линейному изменению выходного напряжения с температурой

[illegible]

Микросхемы MAX6674, MAX6675 (Maxim), предназначенные для применения с термопарой типа К, включают в себя инструментальный усилитель, фильтр нижних частот, буферный усилитель, источник опорного напряжения, АЦП, схему компенсации температуры свободного конца термопары и логическое управляющее устройство. Микросхемы работают с внешним микроконтроллером через SPI-интерфейс. Разрешение АЦП составляет 10 бит и 12 бит с верхним предельным значением измеряемой температуры

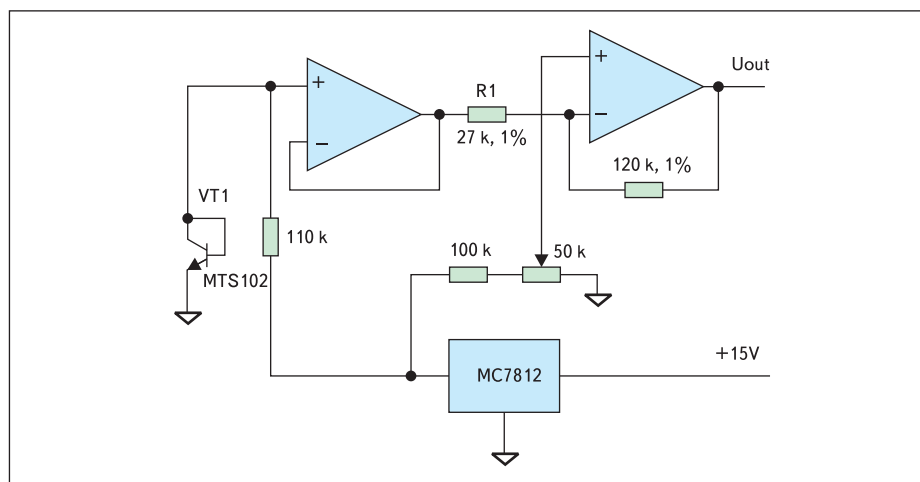


Рис. 10. Схема измерения с транзистором-датчиком температуры

+128 °C и +1024 °C для MAX6674 и MAX6675 соответственно, нижнее значение измеряемой температуры равно 0 °C. Диапазон компенсации температуры свободного конца термодпары –20...+80 °C, погрешность компенсации при этом достигает 3 °C.

Чувствительность термодпар, особенно из благородных металлов, весьма мала, что определяет размах полезного сигнала, равный нескольким милливольтам, максимум десяткам милливольт, и при конструировании усилителей для термодпар необходимо тщательно прорабатывать размещение компонентов на плате. К примеру, термо-ЭДС, вызванная разностью температур концов металлопленочного резистора, может достигать 20 мкВ/°C, что сравнимо с чувствительностью термодпар.

Свободные концы термодпары должны находиться при одинаковой температуре, что обеспечивается их подключением к массивным входным зажимам с хорошей тепловой связью между ними и микросхемой компенсации температуры свободных концов.

Линеаризация передаточной характеристики измерительного устройства аналоговыми методами весьма затруднительна из-за нелинейной характеристики термодпар. Более просто задача линеаризации решается оцифровкой усиленного сигнала с помощью АЦП и последующей обработкой цифровых данных микроконтроллером или персональным компьютером, НСХ термодпары при этом может быть использована в программе обработки, как в табличном виде, так и в виде соответствующих полиномов.

Индивидуальной калибровкой измерительного устройства, использующего термодпару в качестве первичного преобразователя, погрешность измерений можно существенно уменьшить. Это приемлемое решение для лабораторных измерений, в производственных же условиях нарушается принцип взаимозаменяемости, когда по истечении срока службы термодпары или ее поломки калибровка устройства будет нарушена. Погрешность

измерений в некоторых случаях будет заметно большей, чем допустимое отклонение характеристики термодпары от соответствующей НСХ.

Большинство параметров полупроводниковых приборов с *p-n*-переходом в той или иной степени зависят от температуры. Для целей термометрии наиболее подходящим оказалось изменение с температурой прямого падения напряжения на *p-n*-переходе, а наибольшее распространение получила схема измерения напряжения база-эмиттер маломощного планарного кремниевого транзистора при закороченном переходе коллектор-база.

Поведение напряжения база-эмиттер транзистора с температурой описывается следующим выражением

$$U_{BE} = U_{BE(T_1)} - \frac{\Delta E_g - U_{BE(T_1)}}{T_1} (T - T_1) - \frac{m \times k \times T}{q} \times \ln \left(\frac{T}{T_1} \right) + \frac{k \times T}{q} \times \ln \left(\frac{I_K}{I_{K1}} \right),$$

где: $U_{BE(T_1)}$ — напряжение база-эмиттер при конкретных значениях температуры T_1 (K) и токе коллектора I_{K1} ; T — текущая температура (K); T_1 — температура в опорной рабочей точке, при которой измерено значение $U_{BE(T_1)}$; ΔE_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, экстраполированная к $T = 0$ K; m — коэффициент, характеризующий преобладающее влияние тока генерации-рекомбинации или диффузионного тока ($m = 1 \div 2$); k — постоянная Больцмана; q — заряд электрона (Кл); I_K — текущее значение тока коллектора; I_{K1} — значение тока коллектора, при котором измерено $U_{BE(T_1)}$.

Рабочий ток выбирается в пределах 0,1–2 мА. С увеличением рабочего тока проявляется эффект саморазогрева и влияние сопротивления базы. Чувствительность (температурный коэффициент напряжения) равна $-(2 \dots 2,4)$ мВ/°C. Нелинейность характеристики в диапазоне температур $-40 \dots +150$ °C менее ± 1 °C.

Деформация кристалла транзистора из-за разности температурных коэффициентов расширения кремния, материалов выводной рамки и герметизирующего компаунда транзисторов в пластмассовом корпусе тоже ведет к изменению напряжения база-эмиттер, чем и может определяться нелинейность характеристики. Для точных измерений лучше использовать транзисторы в металлическом (коваровом) корпусе, которые к тому же более устойчивы к воздействию таких неблагоприятных факторов окружающей среды, как влажность и некоторое присутствие агрессивных примесей. Проблемой может оказаться изменение изготовителем транзисторов технологии изготовления и топологии кристалла без уведомления.

На рис. 10 приведена схема, опубликованная в [8]. По современным меркам схема далека от идеала, поскольку измерительный преобразователь питается не от прецизионного источника тока, а через резистор от ординарного стабилизатора напряжения, однако достаточно для понимания принципа измерения. Серия транзисторов, специально предназначенных для измерения температуры с нормированием соответствующих параметров, в том числе и MTS102, выпускалась фирмой Motorola. Сейчас изготовители микросхем-датчиков с внешними первичными преобразователями рекомендуют использовать NPN транзисторы 2N3904, MMBT3904 и PNP транзисторы 2N3906.

НПП «ВЭЛ» производит датчики температуры WAD305 ($-269 \dots +250$ °C), WAD306, WAD307 ($-60 \dots +125$ °C), датчики WAD305-1, WAD305-3 ($-196 \dots +150$ °C) имеют защитную арматуру. Долговременная стабильность WAD305 при температурах менее +100 °C не хуже $\pm 0,1$ °C.

Окончание следует

Литература

1. Температурные измерения. Справочник / О. А. Герасченко, А. Н. Гордов и др., — Киев: Наукова думка, 1989.
2. Temperature Measurement. Second Edition. L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee. — John Wiley & Sons, Ltd.
3. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства средств измерений. Метрология. Основные термины и определения.
4. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning. Analog Devices.
5. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические условия.
6. ГОСТ Р 50342-92. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия.
7. ГОСТ Р 8.585-2001. ГСИ. Термодпары. Номинальные статические характеристики.
8. Пэт О'Нил, Карл Деррингтон. Транзисторы в качестве датчиков температуры // Электроника. 1979. № 21. С. 52.