

Термометры сопротивления: от теории к практике

Анатолий АНДРУСЕВИЧ
anatoly.andrusevich@maxim-ic.com
Александр ГУБА,
к. т. н.
alexander.guba@symmetron.ru

В статье рассматривается теория и практика создания систем измерения температуры на основе термометров сопротивления. Проанализированы современные требования и существующие стандарты в данной области, их особенности и отличия. Приведены проверенные примеры практической реализации систем измерения температуры для различных областей применения. Даны практические рекомендации по выбору элементной базы и схемотехнических решений.

Введение

Температура — одна из наиболее часто измеряемых физических величин. Задачи измерения и контроля температуры встречаются практически во всех областях человеческой деятельности. Системы контроля температуры используются для поддержания микроклимата и в различной бытовой технике, где базовым требованием является их доступность. Прецизионное термостатирование в сельском хозяйстве необходимо для выращивания тепличных сельскохозяйственных культур. В химической промышленности и в металлургии часто требуется контроль температуры высокоагрессивных сред в диапазонах в несколько тысяч градусов. На производстве нарушения технологического процесса, связанные с выходом контролируемой температуры за допустимые пределы, могут привести к выпуску партии бракованного товара. В медицине ошибка в измерении температуры может стоить здоровья пациента и даже человеческой жизни. От качества контроля температуры в атомной промышленности, в частности при отливке корпусов реакторов, зависит жизнь всего населения нашей планеты.

Очевидно, что столь разнообразные требования, как по диапазону и точности, так и по типу исполнения и надежности измерительных систем, породили за многие годы большое разнообразие методов и средств, используемых для измерения и контроля температуры.

Ключевым элементом любой системы измерения и контроля температуры является первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент). От его точности и других основных параметров во многом зависят показатели всей системы в целом. Существуют различные типы датчиков температуры, наибольшее распространение среди них получили термопары, полупроводниковые термисторы и термометры сопротивления [5].

Термометры сопротивления

Термометр сопротивления (ТС) состоит из одного или нескольких термочувствительных элементов и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметичный защитный корпус, а также внешних клемм и выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору. Чувствительный элемент (ЧЭ) термометра сопротивления представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки, с выводами для крепления соединительных проводов, имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры [1].

На практике под термином «термометр сопротивления» понимают как герметичный датчик в металлическом или керамическом корпусе с внешним разъемом для подключения к измерительным приборам, так и сам чувствительный элемент, который может быть изготовлен в корпусе с проволочными выводами или в SMD-конструктиве для поверхностного монтажа.

Основные преимущества ТС по сравнению с другими типами датчиков температуры —

это их высокая точность, широкий диапазон рабочих температур, малые размеры, устойчивость к вибрациям, линейность номинальной статической характеристики и относительно высокое значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Основными материалами для изготовления ЧЭ ТС являются платина, медь, никель и их сплавы. На практике чаще применяются платиновые термометры сопротивления (ПТС) с различной чистой платины, которые обладают наивысшей стабильностью характеристик, устойчивостью к воздействию агрессивных сред и широким диапазоном рабочих температур (табл. 1).

По конструкции чувствительного элемента различают пленочные и проволочные термометры сопротивления. Как правило, медные и никелевые ТС изготавливают из проволоки (рис. 1), а платиновые могут быть как проволочными, так и пленочными. Последние имеют меньшую чувствительность к вибрациям, однако предназначены для функционирования в более узком температурном диапазоне (рис. 2). По назначению различают рабочие и эталонные термометры сопротивления, параметры обеих групп ТС регламентированы соответствующими стандартами.

Таблица 1. Сравнительные характеристики распространенных типов датчиков температуры

Тип датчика температуры	Основные преимущества	Основные недостатки	Основные области применения
Термометры сопротивления	Высокая линейность номинальной статической характеристики Широкий диапазон рабочих температур Высокая стабильность основных параметров Устойчивость к воздействию агрессивных сред (ПТС) Относительно невысокая стоимость	Необходимость во внешней схеме для возбуждения	Широко используются как в относительно недорогих, так и в прецизионных системах измерения и контроля температуры
Полупроводниковые термисторы	Дешевизна и доступность Высокий температурный коэффициент сопротивления	Необходимость во внешней схеме для возбуждения Высокая нелинейность номинальной статической характеристики Низкая стабильность основных параметров	Предназначены для применения в недорогих устройствах с низкими требованиями к точности измерений, в простых системах одно- и двухпортового контроля температуры или для организации контроля температуры во второстепенных узлах сложной радиоэлектронной аппаратуры
Термопары	Самый широкий диапазон рабочих температур Высокая повторяемость характеристик Высокое быстродействие	Необходимость компенсации опорного спая Низкое выходное напряжение Необходимость использования крупногабаритных конструкций для компенсации опорного спая для достижения высокой точности измерений	Широко используются в бюджетных устройствах с «электронной» компенсацией опорного спая с невысокой точностью измерений. Используются в сверхпрецизионных измерительных системах 0,01...0,25 °C с компенсацией опорного спая с помощью сосуда Дьюара или специализированных термостатов

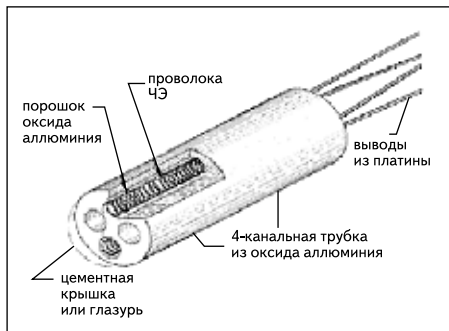


Рис. 1. Проволочная конструкция термометра сопротивления

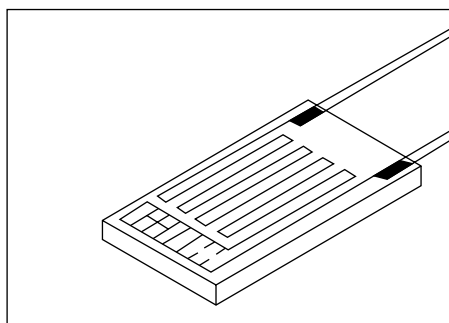


Рис. 2. Пленочный термометр сопротивления

Локальные и международные стандарты на ТС

Существует множество стандартов на рабочие индустриальные ТС, которые имеют локальный или межгосударственный статус. Среди наиболее распространенных — «европейский» МЭК 60751 (DIN/IEC EN 60751) и «североамериканский» ASTM 1137. Многие другие, такие как DIN 43760, BS 1904 (1984) и SAMA RC-4 (1966), несмотря на периодическое их упоминание в литературе, считаются устаревшими. Стандарт МЭК 60751 — один из наиболее распространенных и регламентирует характеристики ПТС с номинальным сопротивлением 100 Ом при температуре 0 °С и температурным коэффициентом сопротивления $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [2]. Стандарт ASTM E1137/E1137M-08 охватывает требования к ПТС для промышленных областей применения с коэффициентом $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур от 0 до +100 °С и номинальным сопротивлением 100 Ом при температуре 0 °С [3].

В России до 01.01.2011 действовал стандарт ГОСТ Р 8.625-2006 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля», который соответствует международному стандарту МЭК 60751 (2008) в части определения зависимости величины сопротивления от температуры и допусков на платиновые ЧЭ и ТС с температурным коэффициентом сопротивления $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Стандарт устанавливает общие технические требования и методы испытаний для технических термометров сопротивления,

чувствительные элементы которых изготовлены из платины, меди и никеля. Эти ТС предназначены для измерения температуры от -200 до +850 °С или в части данного диапазона [1]. С 2011 года в России появился новый, межгосударственный стандарт ГОСТ 6651-2009 «Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля». Общие технические требования и методы испытаний», который создан на основе ГОСТ Р 8.625-2006. К сожалению, на момент сдачи материала в редакцию текст нового стандарта все еще не был доступен. Тем не менее, проект данного стандарта имеется в Интернете и не содержит существенных различий по сравнению с ГОСТ Р 8.625-2006 [4]. Поэтому далее в статье за основу выбраны основные положения стандарта ГОСТ Р 8.625-2006.

Отличие стандартов в разных регионах мира привело к расхождениям в некоторых базовых параметрах ТС у производителей. Например, в различных стандартах используются разные значения ТКС: $\alpha = 0,003923 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (SAMA), $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (DIN/IEC EN 60751), $\alpha = 0,003902 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (US IS), $\alpha = 0,003916 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (JIS) и т. д. Поэтому во избежание ошибок в расчетах при проектировании важно учитывать положения того стандарта, относительно которого нормировались характеристики выбранного термометра сопротивления.

Основные параметры ТС

Основные параметры, определяющие области применения и схемы включения термометров сопротивления, — это температурный коэффициент термометра сопротивления, номинальное сопротивление, диапазон измеряемых температур и номинальная статическая характеристика ТС.

Температурный коэффициент термометра сопротивления

Температурный коэффициент термометра сопротивления характеризует изменение величины сопротивления от температуры:

$$\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_{100} \times 100),$$

где R_{100} , R_0 — значения сопротивления ТС из номинальной статической характеристики (НСХ) при 100 и 0 °С соответственно, округленные до пятого знака после запятой. Как было отмечено ранее, в разных стандартах установлено различное значение ТКС. Для повышения совместимости в ГОСТ Р 8.625-2006 рассматриваются два значения: $\alpha = 0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (соответствует МЭК 60751).

Номинальное сопротивление ТС

Номинальное сопротивление ТС представляет собой нормированное изготовителем сопротивление при 0 °С, округленное до целых единиц, выбираемое из ряда: 10; 50; 100; 500; 1000 Ом [1]. Существуют ТС и с другими значениями номинального сопротивления, однако в настоящее время наибольшее распространение получили ПТС с номинальным сопротивлением 100 Ом при 0 °С. Вместе с тем имеет место тенденция к использованию ТС с величиной номинального сопротивления до 1 кОм и даже 10 кОм. Измерительные системы, в которых используются ТС с высоким значением номинального сопротивления, обладают дополнительными преимуществами, важным из которых является снижение влияния длины соединительных проводов ТС на точность измерений.

Максимальный диапазон измерений ТС

Максимальный диапазон измерений ТС зависит не только от свойств материала, из которого изготовлен чувствительный элемент, но и от конструктивных особенностей, таких как способ и материал изоляции, соединительных элементов и др. Несмотря на то, что действие отечественного стандарта распространяется на диапазон от -200 до +850 °С [1], существуют термометры сопротивления с предельными рабочими температурами, выходящими за его рамки. Для большинства индустриальных рабочих ТС диапазон измерений составляет от -196 до +660 °С (платина), от -50 до +200 °С (медь) и от -60 до +180 °С (никель).

В таблице 2 представлены классы допуска термометров сопротивления, соответствующие ГОСТ Р 8.625-2006 [1].

Таблица 2. Классы допуска и диапазоны измерений для термометров сопротивления и чувствительных элементов

Класс допуска	Допуск, °С	Диапазон измерений, °С			
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ	Никелевый ТС, ЧЭ
		проволочный	пленочный		
AA W 0.1 F 0.1	$\pm(0,1+0,0017 t)^*$	-50...+250	-50...+250	-	-
A W 0.15 F 0.15	$\pm(0,15+0,002 t)$	-100...+450	-50...+450	-50...+120	-
B W 0.3 F 0.3	$\pm(0,3+0,005 t)$	-196...+660	-50...+600	-50...+200	-
C W 0.6 F 0.6	$\pm(0,6+0,01 t)$	-196...+660	-50...+600	-180...+200	-60...+180

Примечание. * |t| — абсолютное значение температуры, °С, без учета знака.

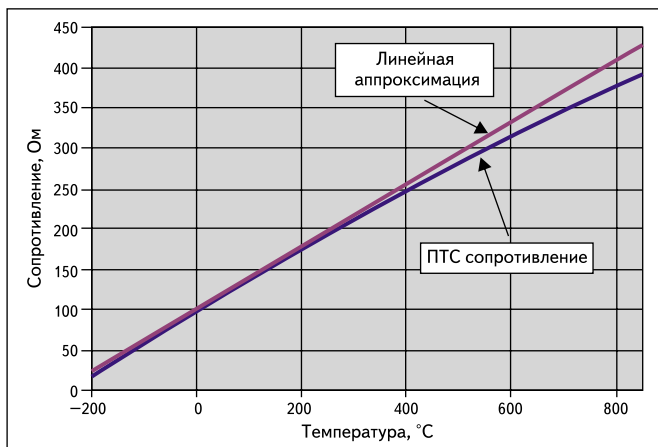


Рис. 3. Зависимость сопротивления ПТС (Pt100) от температуры

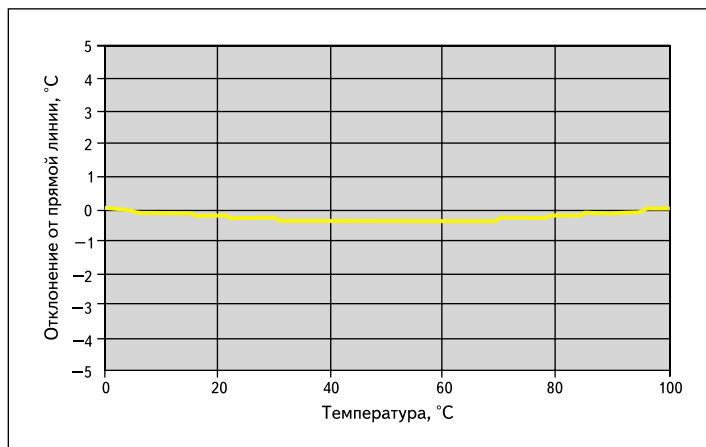


Рис. 4. Погрешность линейной аппроксимации характеристики ПТС (Pt100)

На практике иногда используют ТС, нормированные по двум дополнительным классам точности, их обычно называют “1/10 DIN” и “1/3 DIN”, что означает, соответственно, 1/10 ($\pm 0,03$ °C) и 1/3 ($\pm 0,1$ °C) от класса В при 0 °C.

Номинальная статическая характеристика

Номинальная статическая характеристика (НСХ) представляет собой зависимость сопротивления ТС от температуры. Для ПТС эта зависимость имеет вид (уравнение Каллендара ван Дьюзена):

- в диапазоне от -200 до 0 °C:

$$R_t = R_0[1 + A \times t + B \times t^2 + C(t-100)t^3];$$

- в диапазоне от 0 до $+850$ °C:

$$R_t = R_0(1 + A \times t + B \times t^2),$$

где R_t — сопротивление ТС, Ом, при температуре t °C; R_0 — сопротивление ТС, Ом, при температуре 0 °C; A , B и C — коэффициенты, полученные опытным путем.

Значения коэффициентов A , B и C различны при разных температурных коэффициентах сопротивления:

- $\alpha = 0,00385$ °C $^{-1}$:
 $A = 3,9083 \times 10^{-3}$ °C $^{-1}$,
 $B = -5,775 \times 10^{-7}$ °C $^{-2}$,
 $C = -4,183 \times 10^{-12}$ °C $^{-4}$;
- $\alpha = 0,00391$ °C $^{-1}$:
 $A = 3,969 \times 10^{-3}$ °C $^{-1}$,
 $B = -5,841 \times 10^{-7}$ °C $^{-2}$,
 $C = -4,33 \times 10^{-12}$ °C $^{-4}$.

Для медных и никелевых термометров сопротивления существуют похожие расчетные зависимости, которые можно найти в справочной литературе [1].

Номинальная статическая характеристика для термометра сопротивления может быть представлена в виде таблицы, в которой указаны значения температуры и соответствующие им величины сопротивления ТС, либо в графической форме. На рис. 3 приведена за-

висимость величины сопротивления платинового термометра Pt100 (НСХ) от температуры, построенная по уравнению Каллендара ван Дьюзена. Синей линией обозначена зависимость, полученная с использованием коэффициентов A , B и C . Красная линия — характеристика, полученная в результате линейной аппроксимации при $B = C = 0$ [6].

Величину погрешности, возникающей при линейной аппроксимации характеристики ТС ($B = C = 0$), можно оценить на основе графика, приведенного на рис. 4.

Информация на рис. 4 помогает принять верное решение о целесообразности прецизионной линеаризации характеристики ПТС, которая может потребовать использования дополнительных компонентов, вычислительных ресурсов системного процессора или ограничиться линейной аппроксимацией.

Схемы включения термометров сопротивления

Простейшей схемой включения термометра сопротивления является делитель напряжения (рис. 5). Здесь ТС R_t — его плечо, а источник с напряжением $U_{пит}$ обеспечивает протекание электрического тока в цепи делителя. Падение напряжения на ТС U_t зависит от величины его сопротивления, а следовательно, от температуры окружающей среды $t_{окр}$.

Точность измерений в схеме (рис. 5) будет зависеть от точности и стабильности характеристик ТС R_p , опорного резистора $R_{оп}$ и источника напряжения $U_{пит}$. Для того чтобы снизить погрешность измерений, следует использовать прецизионный высокостабильный резистор $R_{оп}$ и стабилизированный источник опорного напряжения.

Другим негативным фактором является эффект самонагрева термометра сопротивления: протекание в электрической цепи относительно высокого тока (единицы-десятки миллиампер) может привести к дополнительным тепловыделениям на ТС, его нагреву и, как следствие, к резкому снижению точности измерений.

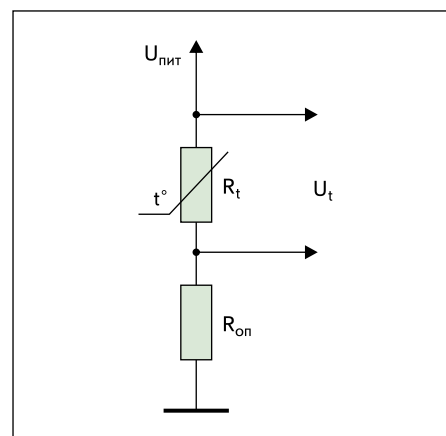


Рис. 5. Схема измерения температуры с использованием ТС на базе делителя напряжения

В качестве примера оценим отклонение температуры в результате самонагрева для высокостабильного прецизионного платинового термометра сопротивления R_t серии PTS 0603 (Vishay) с номинальным сопротивлением $R_0 = 100$ Ом [7]. Выберем, для наглядности, опорный резистор с номиналом $R_{оп} = 1000$ Ом. Пусть величина на выходе стабилизированного источника напряжения составляет $V_{DD} = +5$ В. Суммарное сопротивление цепочки делителя напряжения: $R_{общ} = R_0 + R_{оп} = 100 + 1000 = 1100$ Ом. Тогда величина тока, протекающего через делитель, будет равна: $I_{DD} = V_{DD}/R_{общ} = 5/1100 = 0,0045$ А. Мощность, рассеиваемая на ПТС, приблизительно составит: $P = I_{DD}^2 \times R_0 = 0,0021$ Вт (2,1 мВт). Согласно технической документации на ПТС серии PTS 0603, величина его самонагрева составляет $0,9$ К/мВт при отсутствии принудительной вентиляции. Таким образом, повышение температуры данного ПТС в нашем примере может достичь величины $T_{нагр} = 0,9 \times 2,1 = 1,9$ К. Очевидно, что для задач измерения температуры с точностью порядка десятых долей градуса это более чем допустимая погрешность!

Величина измерительного тока должна быть такой, чтобы самонагрев не приводил

к выходу параметров ТС за пределы допуска. Повышение его сопротивления, обусловленное самонагревом, не должно превышать 20% допуска. Цепи постоянного тока для ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом рекомендуется возбуждать измерительным током 1 мА или менее [1]. Для того чтобы минимизировать влияние этого эффекта, необходимо выбирать опорный резистор с высоким значением номинального сопротивления и/или источник с меньшей величиной напряжения питания. Несмотря на то, что это приведет к падению чувствительности схемы, применение ТС с относительно высоким ТКС и современной элементной базы для нормирования сигналов позволяет скомпенсировать этот недостаток.

На рис. 6 приведен пример практической реализации схемы на основе делителя напряжения с использованием стабилизированного источника опорного напряжения.

Источник опорного напряжения MAX6126A41 с прецизионным резистором R1 обеспечивает возбуждение ТС током около 200 мкА при 0 °С [9]. Коэффициент усиления операционного усилителя с нулевым дрейфом MAX9617 задается прецизионным делителем MAX5491WA30000 и равен $K_y = 31$ [10, 11]. Напряжение на выходе схемы составляет 616 мВ при температуре 0 °С. Изменение напряжения на выходе равно 2,37 мВ/°С. В качестве Pt100 можно использовать прецизионные платиновые термометры сопротивления серий PTS и PTL [7, 8], а в качестве высокостабильного резистора R1, здесь и в других схемотехнических решениях в этой статье, могут быть применены резисторы серий PNR0805 или P805 производства Vishay [12, 13].

Основные недостатки схемы включения (рис. 6) — высокая зависимость тока возбуждения от температуры, что вызывает дополнительную нелинейность, увеличивающую погрешность измерений и сложность организации удаленного подключения ТС, так как сопротивление соединительных проводов в двухпроводной схеме будет оказывать заметное влияние на результаты измерений. Учитывая относительно невысокие номиналы используемых ТС, очевидно, что даже паразитные сопротивления в сотни мОм вызовут недопустимые погрешности в измерениях температуры. Согласно ГОСТ Р 8.625-2006, использование двухпроводной схемы не допускается для ТС классов АА и А (табл. 2).

Несмотря на имеющиеся недостатки, схема может быть использована для организации простых систем измерения температуры, преимущества которых — в низкой себестоимости реализации, малых габаритных размерах и главное — в небольшой удаленности термометра сопротивления от схемы нормирования сигналов.

В случае удаленного подключения ТС длина соединительных проводов будет оказывать влияние на точность измерений, так как измерительный ток будет вызывать дополнительное падение напряжения, прямо пропорцио-

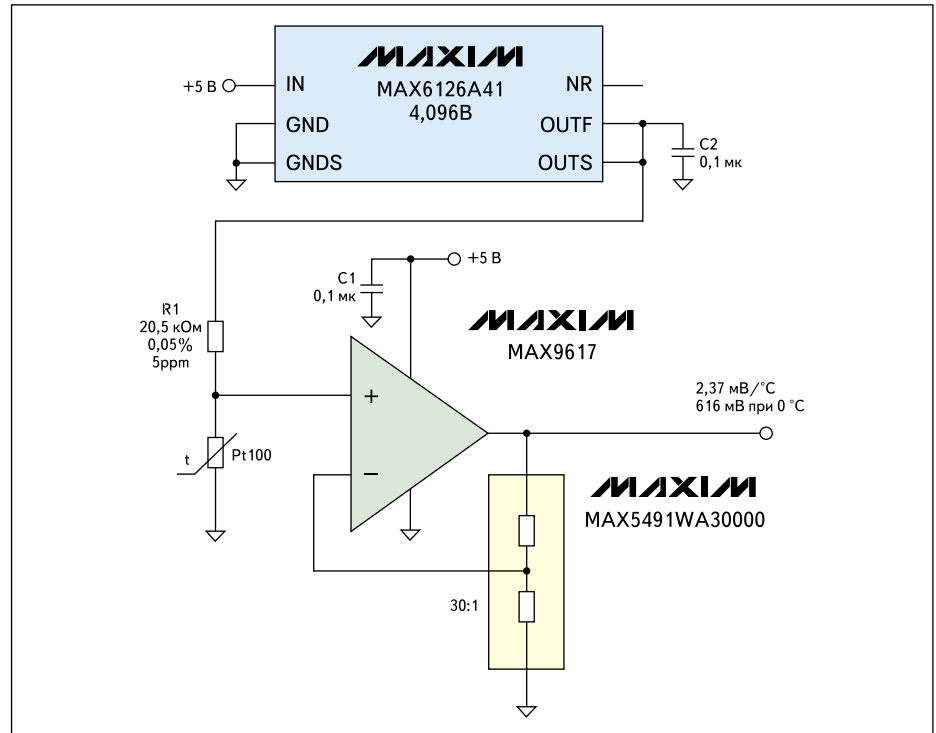


Рис. 6. Простейшая схема подключения термометра сопротивления Pt100

нальное, по закону Ома, величине сопротивления. Поскольку сопротивление проводников зависит от их протяженности, то увеличение расстояния до датчика потребует использования более дорогих соединительных проводников или корректировки подхода к построению измерительной системы.

При необходимости подключения удаленно расположенного термометра сопротивления целесообразней использовать 4-проводную «кельвинскую» схему, в которой

измерительный ток протекает через одну пару, а сами измерения производятся с помощью второй пары соединительных проводов. Для достижения высокой точности измерений необходимо использовать усилители с высоким входным сопротивлением и низкой величиной входного тока.

Указанный принцип реализован в примере на рис. 7. Платиновый термометр сопротивления Pt100 включен по 4-проводной схеме. Повышение линейности достигается

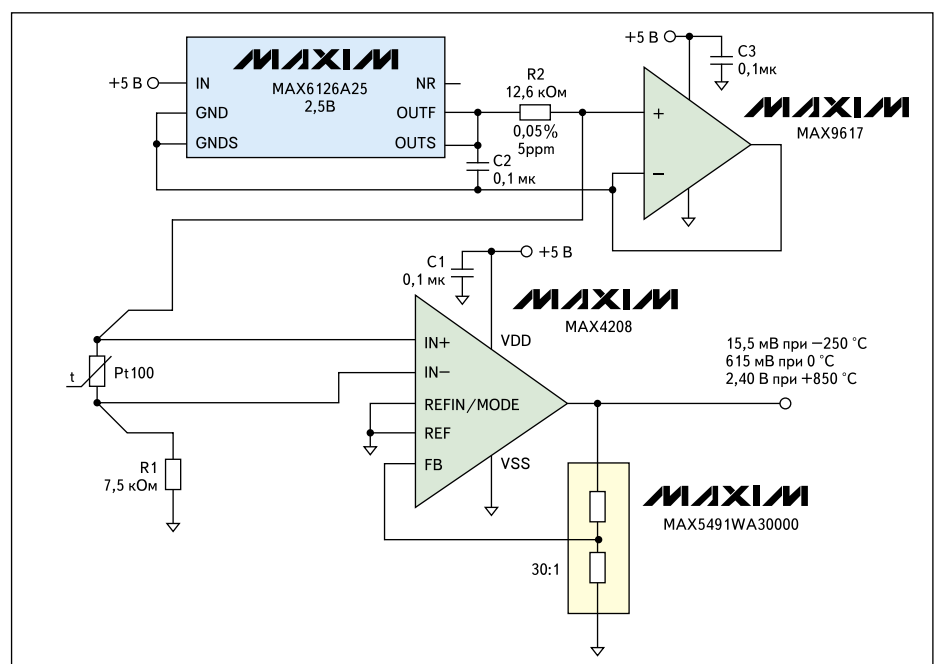


Рис. 7. Схема подключения удаленного термометра сопротивления Pt100 с использованием источника тока

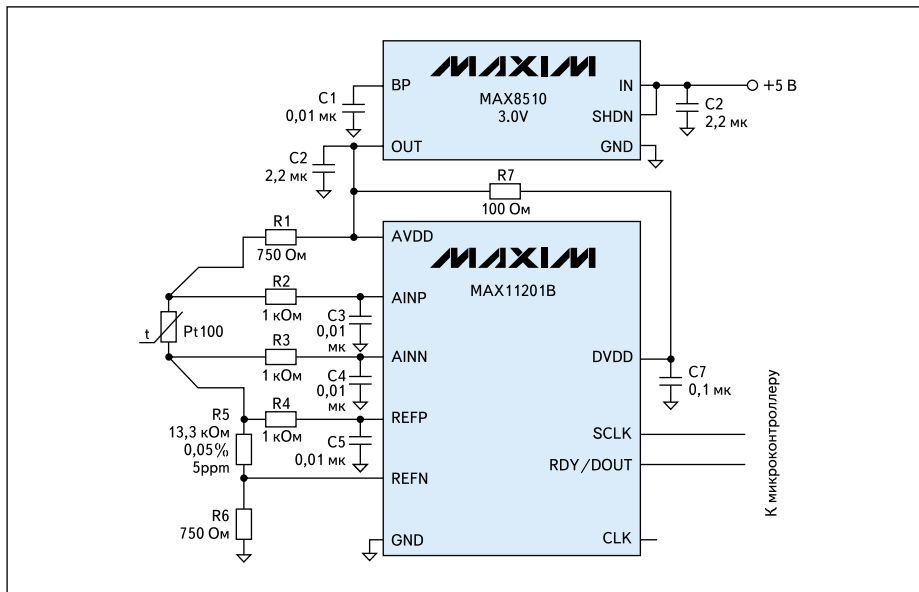


Рис. 8. Прецизионный измеритель температуры

возбуждением ТС стабилизированным источником тока (198 мА), схема которого реализована на источнике опорного напряжения MAX6126A25 и резисторе R2. Операционный усилитель MAX9617 устраняет влияние собственного тока потребления источника опорного напряжения. Инструментальный усилитель MAX4208 имеет входной ток 1 пА и коэффициент подавления синфазной помехи 135 дБ [14]. Резистор R1 предназначен для смещения уровня

сигнала относительно общей шины для более эффективного подавления мощных синфазных помех. Коэффициент усиления инструментального усилителя MAX4208, равный $K_u = 31$, задается с помощью прецизионного делителя MAX5491WA30000. Несколько нестандартный способ задания коэффициента усиления инструментального усилителя обусловлен уникальностью его архитектуры [10]. Напряжение на выходе схемы составит

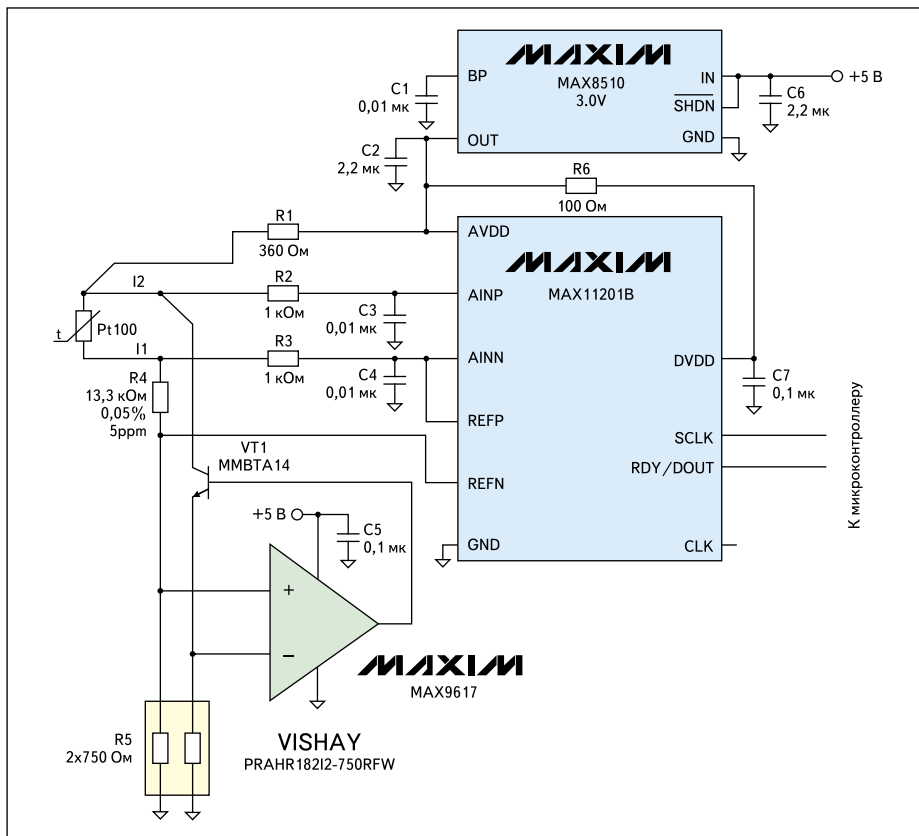


Рис. 9. Прецизионный измеритель температуры с 3-проводным подключением термометра сопротивления

15,5 мВ при температуре $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 615 мВ при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+2,4\text{ В}$ при $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Использование современных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с дифференциальным подключением источника входного сигнала и источника опорного напряжения позволяет не только получить на выходе цифровой сигнал, готовый для ввода в микроконтроллер, но и упростить подключение термометров сопротивления. На рис. 8 представлена схема прецизионного измерителя температуры на основе АЦП.

Применение малошумящего 24-разрядного сигма-дельта АЦП MAX11201B позволяет подключить термометр сопротивления без необходимости использования прецизионных источников тока или напряжения, ограничившись применением недорогого малошумящего стабилизатора с малым падением напряжения (LDO) MAX8510 [15, 16]. Падение напряжения на прецизионном резисторе R5 обеспечивает опорное напряжение на АЦП. Поскольку измерительный ток, протекающий через резистор R5, возбуждает и термометр сопротивления, то любые флуктуации величины тока будут полностью скомпенсированы. Резисторы R1 и R6 обеспечивают нормальную работу встроенных в АЦП буферных усилителей. Они ограничивают абсолютную величину входного и опорного напряжений относительно «земли» в пределах от $+150\text{ мВ}$ до $(AVDD-150)\text{ мВ}$.

Для того чтобы сократить количество соединительных проводов для подключения термосопротивления до трех, в схему можно ввести прецизионное токовое зеркало на операционном усилителе MAX9617 и транзисторе MMBTA14 (рис. 9). Согласованная пара резисторов PRAHR18212-750RFW обеспечит равенство токов I1 и I2 с точностью 0,05%, тем самым компенсируя падение напряжения на соединительных проводах [17]. Последние обязательно должны быть однотипными, одинаковой длины и сечения. В настоящее время производятся различные специализированные экранированные кабели, предназначенные для подключения термометров сопротивления по 2-, 3- и 4-проводным схемам.

Для промышленных применений более предпочтителен биполярный составной транзистор MMBTA14 по сравнению с полевым, особенно при работе в условиях высоких температур. У транзисторов с изолированным затвором (MOSFET) ток утечки затвора удваивается с увеличением температуры на каждые $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и может достигать нескольких десятков нА. Таким образом, ошибка токового зеркала, вызванная управляющим током биполярного транзистора, может быть меньше, чем полевого транзистора с изолированным затвором.

Заключение

Один из способов повышения точности измерений с использованием ТС — их градуировка для получения индивидуальных ко-

эффицентности зависимости величины сопротивления от температуры. Полученные коэффициенты можно, например, хранить в памяти цифровой измерительной системы и вносить в результат измерений соответствующую поправку. Однако этот метод может быть приемлем в мелкосерийном и практически не реализуем при массовом производстве в связи с высокой трудоемкостью самой процедуры градуировки. В данном случае более эффективным решением может быть использование прецизионных термометров сопротивления.

Однако сам факт использования прецизионных ТС не может гарантировать высокую точность системы в целом. При этом большую роль играет адекватность выбранной схемы включения ТС решаемой задаче. Кроме того, необходимо учитывать влияние таких факторов, как длина и качество соединительных проводов и разъемов, обеспечение электромагнитной совместимости за счет эффективного экранирования, фильтрации, грамотной компоновки элементов и разводки печатной платы. Существует и весьма специфический, но ощутимый источник ошибок, такой как эффект влияния температуры кристалла на результаты преобразования АЦП, воздействие которого может быть учтено за счет введения в состав системы дополнительного датчика для измерения температуры кристалла.

Как показывает практика, только подобный, комплексный подход, учитывающий разнообразные аспекты проектирования, позволяет создавать сбалансированные по точности и стоимости системы, имеющие конкурентные преимущества на рынке современной электронной техники. ■

Литература

- ГОСТ Р 8.625-2006 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля». М.; Стандартинформ, 2006.
- IEC EN 60 751. Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum temperature sensors. Edition 2.0. International Electrotechnical Commission.
- ASTM E1137/E1137M-08. Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers.
- ГОСТ 6651-2009 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний». Проект стандарта. Информационный портал www.temperatures.ru
- Промышленная электроника. Руководство разработчика. 2010. Вып. 1. Maxim Integrated Products. www.symmetron.ru
- Thermal Management Handbook. Maxim Integrated Products. www.maxim-ic.com
- Platinum SMD Flat Chip Temperature Sensor. PTS Series. Technical Datasheet, Rev. 11.03.2011. www.vishay.com
- Leaded Platinum Temperature Sensor. PTL Series. Technical Datasheet, Rev. 11.03.2011. www.vishay.com
- MAX6126: Ultra High Precision, Ultra Low Noise, Series Voltage Reference. Technical Datasheet, Rev.5, 12.2010. www.maxim-ic.com
- MAX9617: Single/Dual SC70, Zero-Drift, High-Efficiency, 1.5MHz Op Amps with RRIO. Technical Datasheet, Rev.4, 02.2011. www.maxim-ic.com
- MAX5491: Precision-Matched Resistor-Divider in SOT23. Technical Datasheet, Rev.3, 12.2004. www.maxim-ic.com
- PHR Series. ESCC 4001/023 Qualified High Precision (5 ppm, 0.01%), Thin Film Chip Resistors. Technical Datasheet, Rev. 29.11.2010. www.vishay.com
- P Series. High Precision Wraparound — Wide Ohmic Value Range Thin Film Chip Resistors. Technical Datasheet, Rev. 14.02.2011. www.vishay.com
- MAX4208: Ultra-Low Offset/Drift, Precision Instrumentation Amplifiers with REF Buffer. Technical Datasheet, Rev.1, 04.2009. www.maxim-ic.com
- MAX11201: 24-bit, Single-Channel, Ultra-Low-Power, Delta Sigma ADC with 2-Wire Serial Interface. Technical Datasheet, Rev.0, 06.2010. www.maxim-ic.com
- MAX8510: Ultra-Low-Noise, High PSRR, Low-Dropout, 120 mA Linear Regulators. Technical Datasheet, Rev.3, 05.2006. www.maxim-ic.com
- PRAHR PRA HR (CNW HR) Series. ESA Qualified High Precision Thin Film Chip Resistor Arrays. Technical Datasheet, Rev. 04.10.2010. www.vishay.com