

# Современные термопары и $\Sigma\Delta$ -АЦП высокого разрешения обеспечивают прецизионное измерение температуры

Джозеф ШТАРГОТ (Joseph SHTARGOT)  
Соухейл МИРЗА (Sohail MIRZA)  
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ  
dsioffe@yandex.ru

**В промышленности и медицине часто необходимо измерить температуру с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$  или лучше. И выполнить это нужно за разумную цену в широком диапазоне температур (от  $-270$  до  $+1750^\circ\text{C}$ ), часто при небольшом потреблении энергии. Правильно выбранные стандартизованные современные термопары в сочетании с АЦП высокого разрешения в системах сбора данных (data acquisition systems, DASs) могут обеспечить этот широкий диапазон температур и гарантировать воспроизводимые измерения даже в тяжелых промышленных условиях.**

## Введение

Термопары используются для измерения широкого диапазона температур. Последние достижения в разработке термопар, а также новые стандарты и алгоритмы значительно расширяют этот диапазон температур и точность. Сейчас достижима точность до  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  в широком диапазоне от  $-270$  до  $+1750^\circ\text{C}$ . Чтобы полностью использовать новые возможности термопар, требуются измерительные системы с высоким разрешением. Малошумящие 24-разрядные сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи ( $\Sigma\Delta$ -АЦП) с возможностью разрешения очень малых напряжений прекрасно подходят для этой задачи. С помощью системы сбора данных с оценочным набором для 24-разрядного АЦП можно измерять температуру в широком диапазоне при помощи термопар. Когда термопара, платиновый терморезистор (platinum resistance temperature detector, PRTD) и АЦП интегрированы в одно устройство, получается высококачественная система для измерения температуры. Специально для портативной измерительной аппаратуры можно разработать систему сбора данных на основе АЦП: недорогую и с небольшим потреблением.

## Просто о термопарах

Томас Зеебек (Thomas Seebeck) открыл принцип работы термопары в 1822 году. Термопара — это простое устройство для измерения температуры, которое состоит из двух металлических проводников, «Металл 1» и «Металл 2», соединенных между собой (рис. 1). Зеебек обнаружил, что разные металлы создают разные электрические

потенциалы, зависящие от приложенного к ним перепада температуры. Если соединить одни концы проводников из разных металлов и расположить точку соединения в месте измерения температуры ( $T_{JUNC}$  или горячий спай), то между оставшимися концами, которые находятся при постоянной температуре ( $T_{COLD}$ , постоянная опорная температура), появится напряжение  $V_{OUT}$ . Оно прямо пропорционально разности температур  $T_{JUNC}$  и  $T_{COLD}$ . Таким образом, термопара — это устройство, генерирующее напряжение/зряд без внешнего источника возбуждения.

$V_{OUT}$  зависит от разницы температур ( $T_{JUNC} - T_{COLD}$ ) и типа металлов. Эта зависимость точно описана американским Национальным институтом стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST) в базе данных термопар ITS-90 [1] для большинства используемых на практике сочетаний «Металл 1» и «Металл 2». Эта база данных позволяет рассчитать относительную температуру  $T_{JUNC}$  исходя из значений  $V_{OUT}$ . Однако так как термопара измеряет разность температур, то для того, чтобы определить действитель-

ную температуру горячего спая, должна быть известна абсолютная температура холодного спая (в градусах Цельсия, Фаренгейта или Кельвина). Все современные системы на основе термопар используют дополнительный датчик абсолютной температуры (платиновый терморезистор, кремниевый датчик и т. д.), чтобы точно измерять температуру холодного спая и суммировать ее с разностными показаниями термопары.

Формула, связывающая значения температуры для упрощенной схемы термопары, показанной на рис. 1:

$$T_{abs} = T_{JUNC} + T_{COLD} \quad (1)$$

где  $T_{abs}$  — абсолютная температура горячего спая;  $T_{JUNC}$  — разность между температурой горячего спая и опорной температурой холодного спая;  $T_{COLD}$  — абсолютная опорная температура холодного спая.

Существует множество видов термопар, но некоторые пары из различных металлов работают лучше в большинстве промышленных или медицинских применений. Эти сочетания металлов и/или сплавов стандартизованы

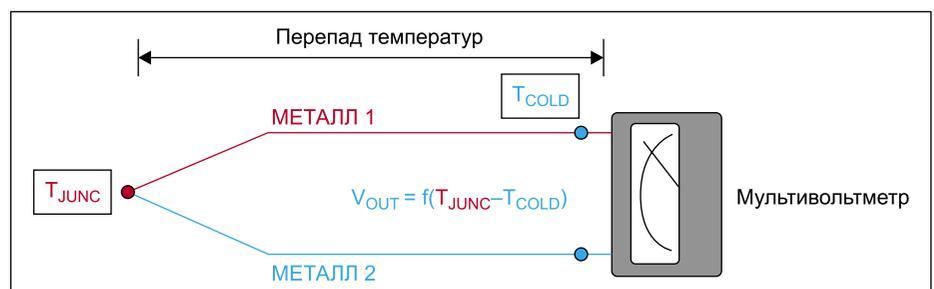


Рис. 1. Упрощенная схема термопары

Таблица 1. Избранные примеры популярных термопар

Тип термопары	Положительный проводник	Отрицательный проводник	Диапазон температур, °C	Коэффициент Зеебека при +20 °C, мкВ/°C
J	Хромель	Константан	0...+760	51
K	Хромель	Алюмель	-200...+1370	41
E	Хромель	Константан	-100...+1000	62
S	Платина (10% родия)	Родий	0...+1750	7

NIST и Международной электротехнической комиссией, МЭК (International Electrotechnical Commission, IEC), и получили обозначения E, J, T, K, N, B, S, R и т. д. NIST и МЭК предоставляют справочные таблицы для каждого из популярных типов термопар [1].

Примеры некоторых наиболее популярных типов термопар (J, K, E и S) показаны в таблице 1.

Термопары типа J широко используются благодаря своему относительно высокому коэффициенту Зеебека, высокой точности и низкой цене. Эти термопары позволяют проводить измерения с точностью до ±0,1 °C с помощью относительно простого алгоритма линейаризации.

Термопары типа K очень популярны в промышленных измерениях, так как они покрывают широкий диапазон температур. У этих термопар высокий коэффициент Зеебека, низкая цена и хорошая устойчивость к окислению. Термопары типа K позволяют измерять температуру с точностью до ±0,1 °C.

Термопары типа E менее распространены, чем другие типы. Однако у них наиболее высокий коэффициент Зеебека. Они требуют меньшего разрешения от измерительной схемы, чем другие типы. Устройства по типу E позволяют измерять температуру с точностью до ±0,5 °C и требуют сложного алгоритма линейаризации.

Термопары типа S состоят из платины и родия, сочетание которых позволяет получить более стабильные и воспроизводимые измерения при очень больших температурах в окисляющей атмосфере. Они имеют низкий коэффициент Зеебека и относительно дороги. Устройства типа S позволяют измерять температуру с точностью до ±1 °C при сложном алгоритме линейаризации.

**Примеры применения**

Электронный интерфейс с термопарой состоит из АЦП высокого разрешения с дифференциальными входами, который способен различать малые напряжения, а также стабильного источника опорного напряжения с малым дрейфом и узла точного измерения температуры холодного спая термопары.

На рис. 2 показан пример упрощенной схемы. 16-разрядный ΣΔ-АЦП MX7705 содержит встроенный усилитель с программируемым коэффициентом усиления (programmable-gain amplifier, PGA), благодаря которому не нужен внешний прецизионный усилитель, и способен разрешать

сигналы уровня микровольт от термопары. MX7705 измеряет напряжение на выходе термопары, а MAX6627 и внешний транзистор измеряют температуру на холодном спая. MAX6002 обеспечивает прецизионное опорное напряжение 2,5 В для MX7705.

Температура на холодном спая измеряется при помощи микросхемы MAX6627, датчика температуры для удаленного диода, и внешнего транзистора в диодном включении, расположенного на разъеме термопары. MX7705 может измерять и ограниченный диапазон отрицательных температур, так как его вход-

ной диапазон синфазного сигнала достигает 30 мВ ниже земли [2].

Для обработки сигналов термопар существуют также специализированные микросхемы. Они содержат локальный датчик температуры, прецизионный усилитель, АЦП и источник опорного напряжения. Например, MAX31855 — это преобразователь температуры в напряжение с компенсацией температуры холодного спая, который может оцифровывать сигналы термопар типов K, J, N, T или E. MAX31855 измеряет температуру при помощи термопары с разрешением 14 разрядов, или 0,25 °C (рис. 3).

**Анализ погрешностей**

**Компенсация температуры холодного спая**

Термопара — это дифференциальный датчик, напряжение на выходе которого порождается разностью температур между горячим

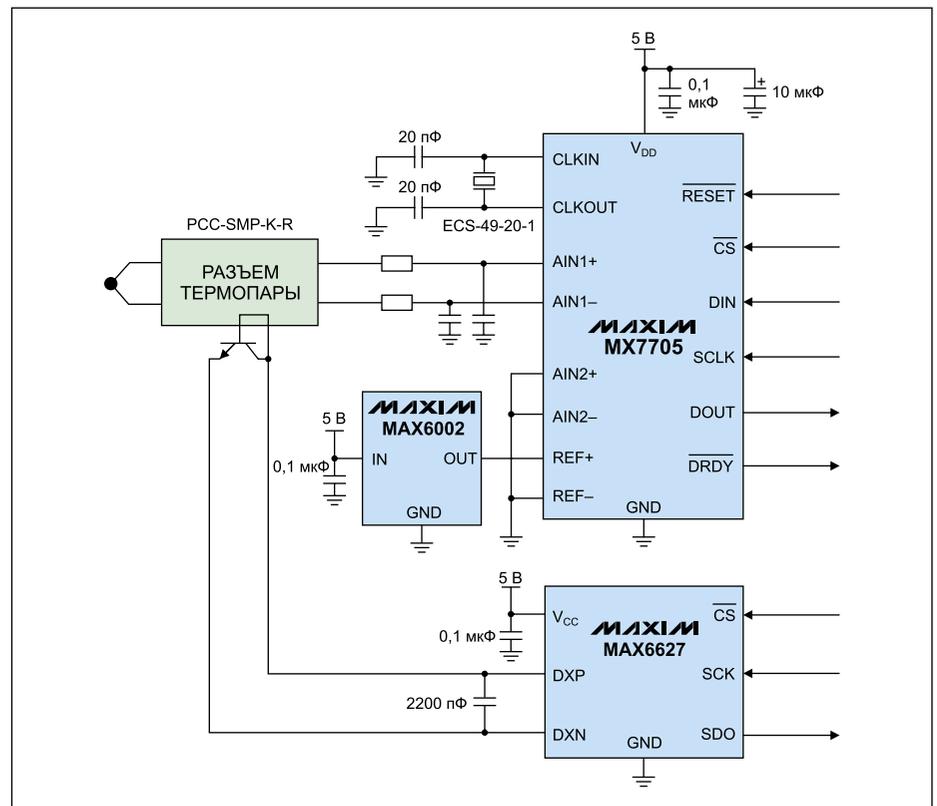


Рис. 2. Схема измерения с термопарой

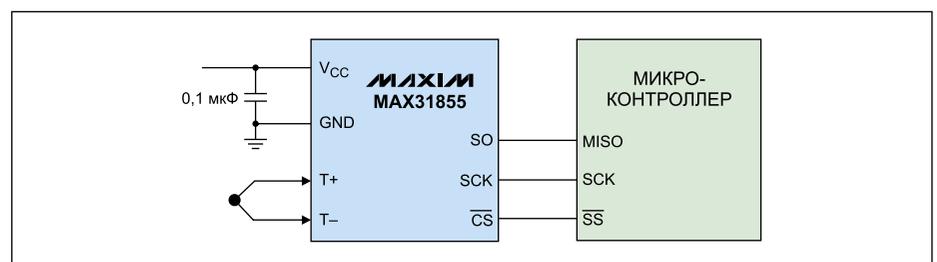


Рис. 3. АЦП со встроенной схемой компенсации температуры холодного спая преобразует напряжение термопары без внешней компенсации

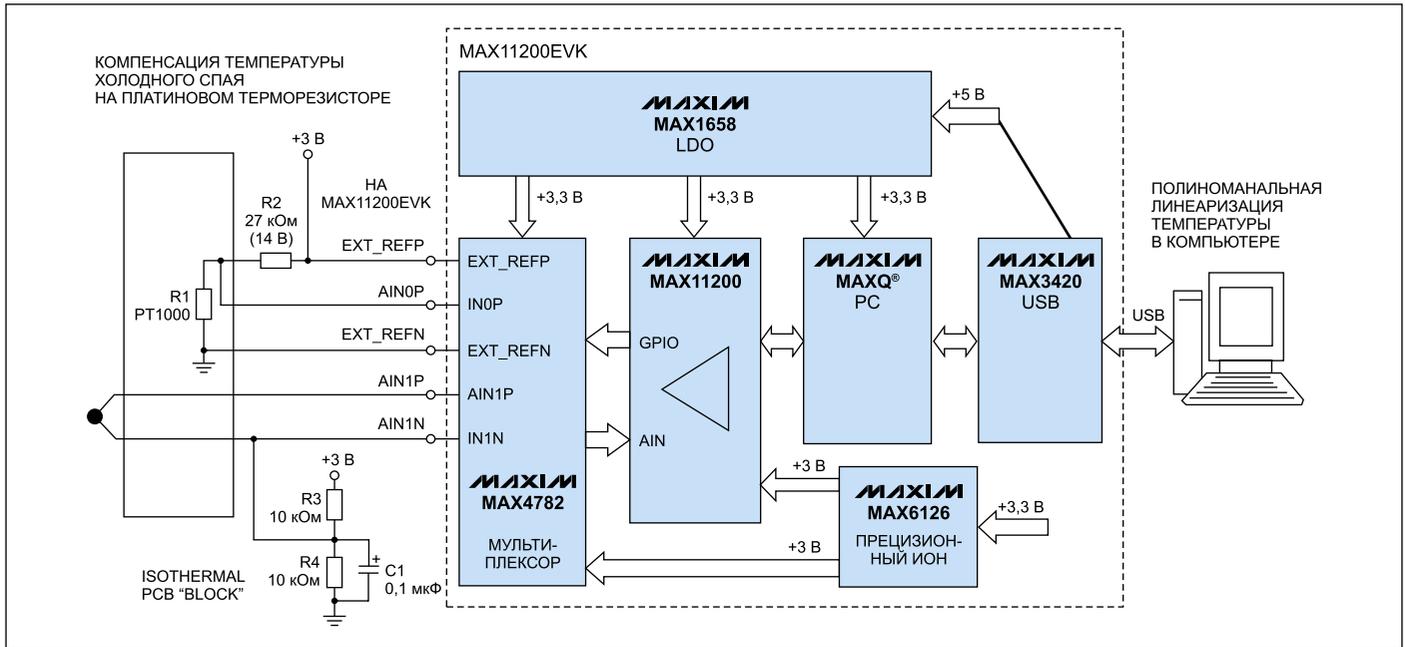


Рис. 4. Упрощенная система сбора данных с термопарой

и холодным спаями. В соответствии с приведенной выше формулой 1 абсолютная температура горячего спая  $T_{abs}$  может быть найдена только в том случае, если можно точно измерить опорную температуру холодного спая  $T_{REF}$ .

Для измерения абсолютной температуры холодного спая можно использовать современные платиновые терморезисторы. Они хорошо работают в широком диапазоне температур и имеют небольшие размеры, малое потребление и разумную цену.

На рис. 4 показана упрощенная схема прецизионной системы сбора данных, которая входит в состав оценочного набора для 24-разрядного  $\Sigma\Delta$ -АЦП и позволяет измерять температуру. Здесь платиновый терморезистор R1 — PT1000 (PTS 1206, 1000 Ом) — используется для измерения абсолютной температуры холодного спая. Такое решение позволяет измерять температуру холодного спая с точностью  $\pm 0,30$  °C или лучше [3].

Как показано на рис. 4, универсальная система ввода/вывода MAX11200 управляет прецизионным мультиплексором MAX4782, который выбирает один из сигналов: от термопары или от платинового терморезистора R1 — PT1000. Такой подход позволяет измерять

сигналы обоих датчиков при помощи одного АЦП. Это улучшает точность системы и упрощает требования к калибровке.

#### Ошибки нелинейности

Термопара генерирует напряжение. Но зависимость выходного напряжения от температуры для большинства термопар не линейна [2, 4].

На рис. 5 и 6 показано, что без правильной компенсации ошибки нелинейности для популярных промышленных термопар типа К могут превышать десятки градусов Цельсия. Кривая на рис. 5 достаточно линейна в диапазоне от  $-50$  до  $+350$  °C. Хорошо видно значительное отклонение от абсолютной линейности ниже  $-50$  и выше  $+350$  °C [1]. Зависимость на рис. 6 можно считать линейной от  $-50$  до  $+350$  °C для средней чувствительности  $k = 41$  мкВ/°C [1].

Современные стандарты, таблицы и формулы для термопар, такие как база данных термопар NIST ITS-90 [1], приняты МЭК и в настоящее время представляют собой основу взаимозаменяемости термопар для разных систем. Эти стандарты позволяют легко заменять термопары от одного или разных производителей, при этом гарантируется

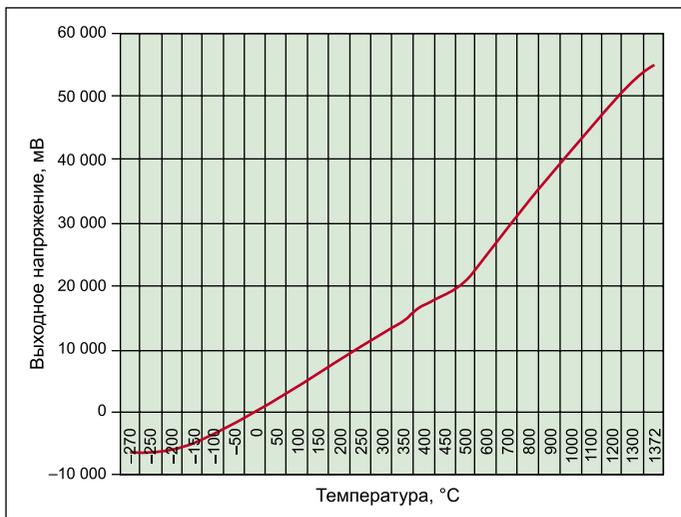


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения термопары типа К от температуры

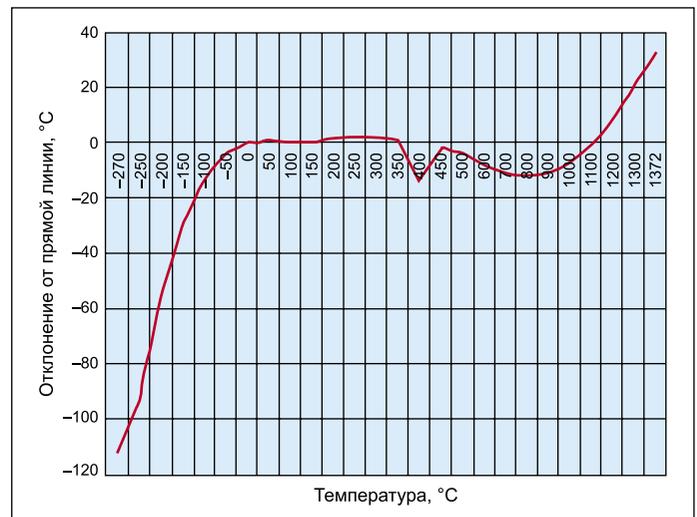


Рис. 6. Отклонение от прямолинейной аппроксимации

качество работы с минимальной доработкой или перекалибровкой системы.

База данных термодатчиков NIST ITS-90 предоставляет подробные таблицы для поиска. При использовании стандартных полиномиальных коэффициентов [1] она также дает возможность применять полиномиальные формулы для преобразования напряжения термодатчика в температуру (°C) для широкого диапазона температур. Полиномиальные коэффициенты, в соответствии с NIST ITS-90:

$$T = d_0 + d_1 E + d_2 E^2 + \dots + d_N E^N, \quad (2)$$

где  $T$  — температура в °C;  $E$  — это измеренное напряжение на выходе термодатчика в мВ;  $d_N$  — полиномиальные коэффициенты, уникальные для каждой термодатчика;  $N$  — максимальный порядок полинома.

Полиномиальные коэффициенты NIST (NBS) для термодатчиков типа К показаны в таблице 2.

**Таблица 2. Коэффициенты термодатчика типа К**

Диапазон температур, °C	-200...0	0...+500	+500...+1372
Диапазон напряжений, мВ	-5,891-0	0-20,644	20,644-54,886
d0	0	0	-1,318058×10 <sup>2</sup>
d1	2,5173462×10	2,508355×10	4,830222×10
d2	-1,1662878	7,860106×10 <sup>2</sup>	-1,646031
d3	-1,0833638	-2,503131×10 <sup>-1</sup>	5,464731×10 <sup>-2</sup>
d4	-8,977354×10 <sup>-1</sup>	8,31527×10 <sup>-2</sup>	-9,650715×10 <sup>-4</sup>
d5	-3,7342377×10 <sup>-1</sup>	-1,228034×10 <sup>-2</sup>	8,802193×10 <sup>-6</sup>
d6	-8,6632643×10 <sup>-2</sup>	9,804036×10 <sup>-4</sup>	-3,11081×10 <sup>-8</sup>
d7	-1,0450598×10 <sup>-2</sup>	4,41303×10 <sup>-5</sup>	-
d8	-5,1920577×10 <sup>-4</sup>	1,057734×10 <sup>-6</sup>	-
d9	-	-1,052755×10 <sup>-8</sup>	-
Диапазон ошибки, °C	-0,02-0,04	-0,05-0,04	-0,05-0,06

Полиномиальные коэффициенты, приведенные в табл. 2, позволяют рассчитать температуру с точностью лучше 0,1 °C для диапазона температур от -200 до +1372 °C. Подобные таблицы с другими уникальными коэффициентами доступны для большинства популярных термодатчиков [1].

Современные коэффициенты NIST ITS-90, которые существуют для диапазонов температур от -200 до 0 °C, от 0 до +500 °C и от +500 до +1372 °C, позволяют вычислять температуру с очень высокой точностью (менее ±0,1 °C против ±0,7 °C для старых методов). Это можно видеть при сравнении с прежними, «одиночными» таблицами интервалов [2].

**Характеристики АЦП и их анализ**

В таблице 3 показаны основные характеристики микросхемы MAX11200, которая входит в состав схемы на рис. 4.

Микросхема MAX11200, описанная в этой статье, — это микромощный 24-разрядный ΣΔ-АЦП для малопотребляющих устройств, от которых требуются широкий динамический диапазон и большое количество разря-

**Таблица 3. Основные характеристики MAX11200**

Характеристики	MAX11200	Комментарии
Частота выборки, 1/с	10-120	Переменная частота передискретизации MAX11200 может быть оптимизирована для уменьшения шумов и ослабления помехи сети переменного тока частотой 50 или 60 Гц до -150 дБ
Каналы	1	Универсальная схема ввода/вывода позволяет управлять внешним мультиплексором для многоканальных измерений
Интегральная нелинейность, ppm (max)	±10	Обеспечивает хорошую линейность измерений
Ошибка смещения, мкВ	±1	Обеспечивает почти нулевое смещение при измерениях
Разрешение, свободное от шумов, бит	19 при значении 120 выборок/с; 19,5 при значении 60 выборок/с; 21 при значении 10 выборок/с	Хороший динамический диапазон при малом потреблении
Напряжение питания, В	Аналоговое 2,7-3,6 Цифровое 1,7-3,6	Аналоговое и цифровое напряжения питания покрывают популярные промышленные диапазоны питания
Максимальный ток потребления, мкА	300	Наивысшее разрешение на единицу мощности в промышленности; оптимальное для портативных применений
Универсальная схема ввода/вывода	Есть	Позволяет управлять внешними устройствами, включая локальное управление мультиплексорами
Входной диапазон	0...V <sub>REF</sub> , ±V <sub>REF</sub>	Широкий входной диапазон
Корпуса	16-QSOP, 10-µMAX	Некоторые модели, как MAX11202, поставляются в корпусе 10-µMAX — очень малый размер для проектов с ограниченными габаритами

дов, свободных от шумов. Используя этот АЦП, можно рассчитать температурное разрешение схемы на рис. 3 по формулам 3 и 4:

$$R_{t_{lsb}} = \frac{V_{REF} \times (T_{cmax} - T_{cmin})}{FS \times (V_{tmax} - V_{tmin})}, \quad (3)$$

$$R_{t_{nfr}} = \frac{V_{REF} \times (T_{cmax} - T_{cmin})}{NFR \times (V_{tmax} - V_{tmin})}. \quad (4)$$

Здесь  $R_{t_{lsb}}$  — разрешение термодатчика для 1 МЗР;  $R_{t_{nfr}}$  — свободное от шумов разрешение термодатчика;  $V_{REF}$  — опорное напряжение;  $T_{cmax}$  — максимальная температура термодатчика в диапазоне измерений;  $T_{cmin}$  — минимальная температура термодатчика в диапазоне измерений;  $V_{tmax}$  — максимальное напряжение термодатчика в диапазоне измерений;  $V_{tmin}$  — минимальное напряжение термодатчика в диапазоне измерений;  $FS$  — код полной шкалы (full scale) АЦП для MAX11200 в биполярной конфигурации (2<sup>23</sup>-1);  $NFR$  — свободное от шумов разрешение (noise-free resolution) MAX11200 в биполярной конфигурации (2<sup>20</sup>-1) при значении 10 выборок/с.

В таблице 4 показаны расчеты разрешения по формулам 3 и 4 для термодатчиков типа К, данные которых были приведены в таблице 1.

Таблица 4 содержит величины ошибок °C/LSB и °C/NFR, рассчитанные для каждого диапазона температур. Свободное от шума разрешение NFR представляет собой минимальную величину перепада температур, которую может надежно различить АЦП. Для всех температурных диапазонов значение NFR меньше 0,1 °C, этого более чем достаточно для большинства термодатчиков в промышленных и медицинских применениях.

**Таблица 4. Разрешение термодатчиков типа К для разных диапазонов температур**

Диапазон температур, °C	-200...0	0...+500	500...+1372
Диапазон напряжений, мВ	-5,891	20,644	34,242
Разрешение R <sub>t<sub>lsb</sub></sub> , °C/LSB	0,0121	0,0087	0,0091
Разрешение R <sub>t<sub>nfr</sub></sub> , °C/NFR	0,0971	0,0693	0,0729

**Подключение к термодатчику через оценочный набор MAX11200EV**

MAX11200EVKIT содержит полнофункциональную систему сбора данных высокого разрешения. Этот оценочный набор может помочь инженеру-разработчику ускорить решение встающих перед ним задач, таких как проверка схемного решения, предложенного на рис. 4.

На этой схеме популярная термодатчика типа К OMEGA (KTSS-116 [5]) подключена к дифференциальному входу А1 оценочного набора. Измерение абсолютной температуры холодного спая выполнено на основе экономичного логотрического метода, описанного в статье “Application Note 4875” фирмы Maxim [3]. Выход R1 (PT1000) подключен к входу А0. Универсальная схема ввода/вывода MAX11200 сконфигурирована для управления прецизионным мультиплексором MAX4782, который по очереди подключает выход термодатчика или платинового терморезистора R1 к входу MAX11200.

Термодатчики типа К линейны в диапазоне температур от -50 до +350 °C. Для некоторых простых применений формула 5 позволяет значительно уменьшить объем и сложность расчетов.

Приближенно абсолютная температура может быть вычислена так:

$$T_{abs} = E + (E_{cj}/k), \quad (5)$$

где  $E$  — измеренное напряжение на выходе термодатчика, мВ;  $T_{abs}$  — абсолютная температура термодатчика типа К, °C;  $E_{cj}$  — эквивалентное выходное напряжение холодного спая термодатчика, рассчитанное с помощью  $T_{cj}$  (температура холодного спая термодатчика (°C), измеренная PT1000 [3]).

Поэтому  $k = 0,041$  мВ/°C — средняя чувствительность в диапазоне температур от -50 до +350 °C.

Однако для реализации точных измерений в более широком диапазоне температур (от -270 до +1372 °C) настоятельно рекомендуется использовать полиномиальные фор-



Рис. 7. Отладочная система

Таблица 5. Измерения и расчеты для диапазона температур от  $-200$  до  $+1300$  °C

Температура (Fluke-724), °C	Код измерений PT1000 на холодном спае (МЗР)	Коды термопары относительно точки 0 °C, полученной с PT1000 (МЗР)	Температура, рассчитанная по формуле 6 и таблице 2, °C	Ошибка температуры относительно калибратора, °C	Температура, рассчитанная по «линейной» формуле 5, °C
-200	326576	-16463	-199,72	0,28	-143,6
-100	326604	-9930	-99,92	0,08	-86,62
-50	326570	-5274	-50,28	-0,28	-46,01
0	326553	6	0	0	0,05
20	326590	2257	20,19	0,19	19,68
100	326583	11460	100,02	0,02	99,96
200	326486	22779	200,18	0,18	198,69
500	326414	57747	500,16	0,16	503,7
1000	326520	115438	1000,18	0,18	1006,92
1300	326544	146562	1300,09	0,09	1278,4

мулы (2) и коэффициенты (в соответствии с NIST ITS-90):

$$T_{abs} = f(E + E_{cj}), \quad (6)$$

где  $T_{abs}$  — абсолютная температура термопары типа К, °C;  $E$  — измеренное напряжение на выходе термопары, мВ;  $E_{cj}$  — эквивалентное выходное напряжение холодного спае термопары, рассчитанное с помощью  $T_{cj}$ ;  $f$  — полиномиальная функция в соответствии с выражением (2);  $T_{COLD}$  — температура холодного спае термопары (°C), измеренная PT1000.

На рис. 7 показана отладочная система для схемы на рис. 4. В эту систему входит сертифицированный прецизионный калибратор — Fluke-724. Он применяется как температурный имитатор для замены термопары типа К OMEGA.

Калибратор Fluke-724 вырабатывает прецизионное напряжение, которое соответствует выходному напряжению термопары типа К в диапазоне температур от  $-200$  до  $+1300$  °C. Система сбора данных на MAX11200 по очереди измеряет напряжения на выходах термопары и платинового терморезистора и передает данные через порт USB в ноутбук. Специально разработанное для системы сбора данных программное обеспечение собирает и обрабатывает данные от обоих датчиков.

В таблице 5 показаны результаты измерений и расчетов с использованием формул 5 и 6 для диапазона температур от  $-200$  до  $+1300$  °C.

Согласно таблице 5, при использовании формулы 6 от системы сбора данных на базе MAX11200 можно получить точность порядка  $\pm 0,3$  °C в очень широком диапазоне температур. Линейная аппроксимация по формуле 5 дает точность только от 1 до 4 °C в более узком диапазоне температур от  $-50$  до  $+350$  °C.

Заметим, что использование формулы 6 требует относительно сложных расчетов по алгоритму линеаризации.

Около десяти лет назад реализовать такие алгоритмы при разработке систем сбора данных было трудно из-за технических сложностей и ограничений по стоимости. Сегодня современные процессоры позволяют быстро и недорого решать такие проблемы.

## Выводы

В последние годы разработаны недорогие способы измерения температуры на основе термопар для очень широкого диапазона температур, порядка  $-270 \dots +1750$  °C. Улучшение качества измерений температуры и расширение диапазона сопровождалось разумными ценами и часто очень малой потребляемой мощностью.

Для такого измерения температуры при помощи термопар требуется малощумящий АЦП (подобный MAX11200), если АЦП и термопара соединены непосредственно. Термопара, платиновый терморезистор и АЦП совместно образуют высококачественную систему для измерения температуры, оптимальную для портативной измерительной аппаратуры.

Высокое свободное от шумов разрешение, встроенные буферы и универсальная система ввода/вывода позволяют подключать MAX11200 непосредственно к традиционной термопаре и платиновому терморезистору высокого разрешения (подобному PT1000) без добавочного инструментального усилителя или специальных источников тока. Отсутствие лишних проводов и небольшие температурные ошибки уменьшают сложность и стоимость системы, что позволяет разработчику упростить подключение системы сбора данных к термопаре и модулю компенсации температуры холодного спае.

## Литература

1. Сетевые базы данных NIST (NIST online databases).
2. [http://srdata.nist.gov/its90/main/its90\\_main\\_page.html](http://srdata.nist.gov/its90/main/its90_main_page.html)
3. Thermal Management Handbook — <http://www.maximic.com/app-notes/index.mvp/id/4679>
4. High-Accuracy Temperature Measurements Call for Platinum Resistance Temperature Detectors (PRTDs) and Precision Delta-Sigma ADCs — <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4875>
5. Using Thermocouples. Thermocouple Introduction and Theory (PDF) — [www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf](http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf)
6. Type-K OMEGA thermocouple KTSS-116 (PDF) — [www.omega.com/Temperature/pdf/KTSS\\_JTSS\\_CHB.pdf](http://www.omega.com/Temperature/pdf/KTSS_JTSS_CHB.pdf)
7. Modern Thermocouples and a High-Resolution Delta-Sigma ADC Enable High-Precision Temperature Measurement — <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/5032>