

Измерение температуры: теория и практика

Виктор Гарсия

Введение

С понятиями «температура», «измерение температуры», «термометр» мы постоянно сталкиваемся как при рассмотрении физических или химических процессов в науке и производстве, так и в быту, когда ставим больному градусник или смотрим на спиртовой термометр за окном чтобы узнать, надевать ли теплое пальто. Однако обычно при этом под температурой мы понимаем просто степень нагретости тела и не задумываемся о том, что же такое температура с физической точки зрения. Между тем для точного измерения температуры в рамках какого-либо технологического процесса или научного эксперимента необходимо правильно построить измерительную систему с учетом всех влияющих факторов. Предметом данной статьи является техника измерения температуры применительно к АСУ ТП и другим контрольно-измерительным электронным системам.

Немного теории

Для корректного изложения вопросов измерения температуры необходимо дать ее точное физическое определение. Итак,

температура — физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества.

Из определения температуры следует, что она не может быть измерена непосредственно и судить о ней можно по изменению других физических свойств тел (объема, давления, электрического сопротивления, термоЭДС, интенсивности излучения и т.д.). В зависимости от диапазона измеряемых температур различают две основные группы методов измерения: контактные (собственно термометрия) и бесконтактные (пирометрия или термометрия излучения), применяемые в основном для измерения очень высоких температур. В первую, более обширную группу входят жидкостные, манометрические, термоэлектрические термометры, термометры сопротивления и др. Для измерения криогенных температур используются также газовые, акустические и магнитные термометры. Кроме того, в системах, не требующих высокой точности измерений, в определенном диапазоне температур широко используются полупроводниковые датчики температуры на диодах, транзисторах и специальных интегральных микросхемах.

Немного истории

Первое достоверно известное устройство для измерения температуры было создано Г. Галилеем около 1595 г. Этот прибор (термоскоп) использовал явление изменения объема газа при нагревании и охлаждении. Однако этот прибор (и последующие аналоги) имел

большой недостаток: его шкала была относительной и показания не могли быть выражены в численной форме.

Крупным шагом в развитии термометрии было введение изобретателем ртутного термометра Г. Фаренгейтом (G. Fahrenheit) в начале 18 века первой температурной шкалы, названной его именем, опирающейся на две опорные точки. В качестве нижней опорной точки (0°F) он использовал температуру замерзания солевого раствора, самую низкую воспроизводимую в то время, а в качестве верхней точки — температуру тела человека (96°F — в старину было удобнее считать дюжинами). Сам изобретатель определял вторую эталонную точку как температуру под мышкой здорового англичанина.

Привычная нам десятичная температурная шкала была предложена А. Цельсием (A. Celsius) в 1742 году. В качестве опорных точек для нее используются температура плавления льда (0°C) и температура кипения воды (100°C). Наконец, в начале 19 века английским ученым лордом Кельвином (Kelvin) была предложена универсальная абсолютная термодинамическая температурная шкала, ставшая стандартной в современной термометрии. Одновременно Кельвин обосновал понятие абсолютного нуля температуры. Перевести температуру из одной шкалы в другую можно с помощью следующих простых соотношений:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32)$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

Таким образом, 0°C соответствует 32°F и 273,15 K, а 100°C — 212°F и 373,15 K. Выбор между этими опорными точками 100 делений у шкалы Цельсия и 180 делений у шкалы Фаренгейта является чисто условным (как, впрочем, и выбор самих опорных точек). Для обеспечения единства измерений температуры в качестве международного стандарта в 1968 году принята Международная Практическая Температурная Шкала МПТШ-68 (в настоящее время в качестве стандарта принята уточненная в 1990 году версия шкалы ITS-90), использующая в качестве опорных точек температуры изменения агрегатного состояния определенных веществ, которые могут быть воспроизведены. Кроме того, стандарт определяет типы образцовых средств измерения во всем диапазоне температур. Перечень основных фиксированных точек МПТШ-68 приведен в таблице 1.

Таблица 1. Перечень основных фиксированных точек МПТШ-68

Наименование	Температура, К	Образцовое средство измерения
Точка затвердевания золота	1337,58	свыше 1337,58 К — спектральный пирометр
Точка затвердевания серебра	1235,08	от 903,89 К до 1337,58 К — термопара платина/платина-родий (10% Rh)
Точка затвердевания цинка	692,73	от 13,81 К до 903,89 К — платиновый термометр сопротивления
Точка кипения воды	373,15	
Тройная точка воды	273,16	
Точка кипения кислорода	90,188	
Тройная точка кислорода	54,361	
Точка кипения неона	27,102	
Точка кипения равновесного водорода	20,28	
Тройная точка равновесного водорода	13,81	

Термопары

Явление термоэлектричества было открыто немецким физиком Т. Зеебеком (Т. Seebeck) в 1821 г. и состоит в следующем. Если соединить два проводника (термоэлектродов) из разнородных металлов или сплавов таким образом, чтобы они образовали замкнутую электрическую цепь (рис. 1), и затем поддерживать места контактов (спай) при различной температуре, то в цепи будет протекать постоянный ток.

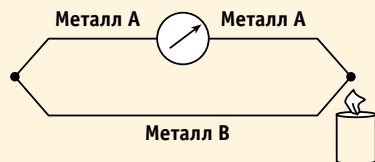


Рис. 1. Эффект Зеебека

Говорят, что термоэлектрод А положителен по отношению к В, если ток течет от А к В в более холодном из двух контактов. Электродвижущая сила, вызывающая этот ток, называется термоЭДС Зеебека и зависит только от материала термоэлектродов и разности температур спаев.

$$E = \alpha(T_2 - T_1),$$

где α — коэффициент пропорциональности (коэффициент Зеебека).

Таким образом, зная температуру одного спая (обычно ее поддерживают постоянной, например, равной 0°C) и измеряя этот ток или напряжение, можно однозначно определить неизвестную температуру другого спая.

Конструкции и материалы для изготовления термопар весьма разнообразны (рис. 2) и определяются физическими и химическими свойствами веществ, температуру которых необходимо измерять. Различают три основных типа термо-



Рис. 2. Конструкции термопар весьма разнообразны



Рис. 3. Типы термопар: а) с открытым контактом; б) с изолированным незаземленным контактом; в) с заземленным контактом

пар (рис. 3): с открытым контактом, с изолированным незаземленным контактом и с заземленным контактом. Термопары с открытым контактом имеют малую коррозионную стойкость и малую постоянную времени и пригодны для измерения температуры жидкости и газа в потоке, а также твердых тел. Два других типа термопар пригодны для измерений в агрессивных средах. В таблице 2 приводятся основные типы термопар и их параметры в соответствии с международной спецификацией, а в таблице 3 — наиболее распространенные варианты конструктивного исполнения термопар и области их применения.

Практическое применение термопар

Измерение температуры с помощью термопар основывается на нормированных калибровочных характеристиках термопар и законах термоэлектричества, установленных опытным путем.

1. Закон внутренних температур. Наличие температурного градиента в однородном проводнике не приводит к возникновению электрического тока (рис. 4). Таким образом, термоЭДС определяется только разностью температур в местах контакта различных проводников.

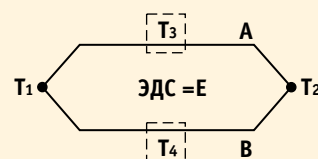


Рис. 4. Закон внутренних температур

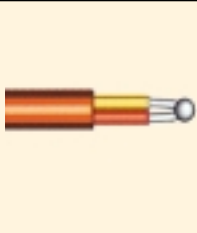
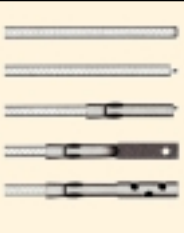
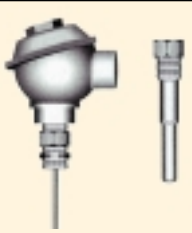
2. Закон промежуточных проводников. Пусть два однородных проводника из металлов А и В образуют термоэлектрическую цепь с контактами, имеющими температуры T_1 и

Таблица 2. Основные типы термопар и их параметры в соответствии с международной спецификацией

Обозначение, ANSI	Тип по ГОСТ*	Материал термоэлектродов		Диапазон рабочих температур	Максимальная погрешность	Цветовая кодировка		
		положительного	отрицательного			ANSI США	МЭК 584-3	DIN 43710
J	—	железо Fe	константан Cu - Ni	от -210 до +1200 °C	2,2 °C или 0,75%			
K	ТХА	хромель Cr - Ni	алюмель Ni - Al	от -270 до +1372 °C	2,2 °C или 0,75% выше 0°C, 2,2 °C или 2% ниже			
T	—	медь Cu	константан Cu - Ni	от -270 до +400 °C	1 °C или 0,75% выше 0°C, 1 °C или 1,5% ниже			
E	—	хромель Cr - Ni	константан Cu - Ni	от -270 до +1000 °C	1,7 °C или 0,5% выше 0°C, 1,7 °C или 1% ниже			
N	—	никросил Ni - Cr - Si	нисил Ni - Si - Mg	от -270 до +1300 °C	2,2 °C или 0,75% выше 0°C, 2,2 °C или 2% ниже			—
R	—	платина-родий (13% Rh)	платина Pt	от -50 до +1768 °C	1,5 °C или 0,25%	—		
S	ТПП	платина-родий Pt - Rh (10% Rh)	платина Pt	от -50 до +1768 °C	1,5 °C или 0,25%	—		
B	ТПР	платина-родий t - Rh (30% Rh)	платина-родий Pt - Rh (6% Rh)	от 0 до +1820 °C	0,5% свыше +800 °C	—	—	
C	ТВР	вольфрам-рений W - Re (5% Re)	вольфрам-рений W - Re (26% Re)	от 0 до +2320 °C	4,5 °C до +425 °C, 1% до +2320 °C	—	—	—

* Приведены типы, совпадающие с международными стандартами

Таблица 3. Основные варианты конструктивного исполнения термопар

					
Конструкция термопары	Неизолированная тонкопроволочная с открытым контактом	Изолированная с открытым контактом	Изолированная на самоклеящейся основе	Изолированная в керамической оболочке	В металлическом корпусе с встроенными клеммами, для установки в гильзу
Допустимая рабочая температура	До 2300 °С	До 500 °С	От -60 °С до +175 °С	До 1100 °С	До 1150 °С
Основные достоинства	Малые размеры, малая постоянная времени, возможность точечного измерения, не отводит тепло от измеряемого объекта	Ограниченная длина проводников для уменьшения ошибок, малая постоянная времени	Малая постоянная времени, малая тепловая инерция, удобная самоклеящаяся основа	Гибкая конструкция, стойкость к истиранию, работа при высоких температурах	Высокая коррозионная стойкость в промышленных условиях, возможность установки в гильзу
Приложения	Биофизика, медицина, криогенная техника, измерение быстро изменяющихся температур. Не подходит для использования в жидкостях и агрессивных средах.	Измерение температур газов и поверхностей. Изоляционная оболочка из тефлона или стекла обеспечивает химическую и термическую стойкость	Измерение температуры поверхностей, легко снимается и устанавливается	Печи, термощафы, станкостроение	Измерения в тяжелых промышленных условиях, использование с гильзами различных типов

T_2 (рис. 5). В разрыв проводника А включается проводник из металла Х, и образуются два новых контакта — J_1 и J_2 . Если температура проводника Х одинакова по всей длине, то результирующая термоЭДС цепи не изменится. Этот важный закон позволяет:

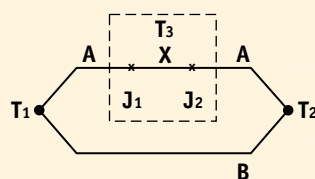


Рис. 5. Закон промежуточных проводников

а) спаивать (а не сваривать) концы электродов, б) использовать удлинительные провода для подключения термопар к измерительным приборам.

3. Закон промежуточной температуры. Если в цепи, образованной двумя термоэлектродами из разнородных металлов, индуцируется термоЭДС E_1 при температурах контактов T_1 и T_2 и термоЭДС E_2 при температурах контактов T_2 и T_3 , то при температурах T_1 и T_3 ЭДС будет равна $E_1 + E_2$. Это означает, что градуировочные таблицы можно использовать и при температуре опорного контакта, не равной 0 °С (рис. 6).

4. Закон аддитивности термоЭДС. Если известны термоЭДС металлов А и В в паре с опорным металлом R, то термоЭДС пары А с В будет равна их сумме (рис. 7). Это означает, что можно создавать нестандартные комбинации термоэлектродов и по-прежнему пользоваться для них градуировочными таблицами.

При подключении термопар к измерительным устройствам обязательно возникают дополнительные контакты между термопарой и соединительными проводниками. Допустим, мы хотим подключить термопару медь-константан с рабочим спаем J_1 , имеющим температуру T_1 , и свободными концами с температурой T_2 , к вольтметру медными проводниками и непосредственно измерить термоЭДС (рис. 8). В

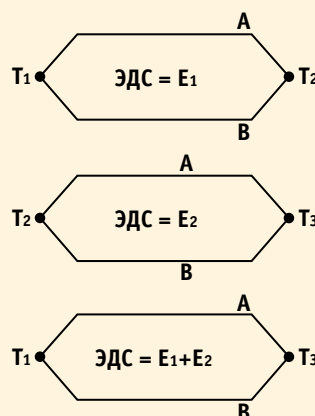


Рис. 6. Закон промежуточной температуры

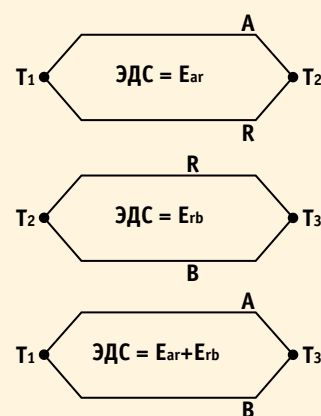


Рис. 7. Закон аддитивности термоЭДС

этом случае показания вольтметра не будут соответствовать истинной разности температур T_1 и T_2 для термопары медь-константан, поскольку, подсоединив термопару, мы получим два новых контакта J_2 и J_3 с температурами T_2 и T_3 . Контакт J_2 (медь-медь) не вносит в цепь паразитной термоЭДС, но контакт J_3 (константан-медь) образует новую термопару, спай которой находится при температуре T_3 , вносящую в цепь дополнительную термоЭДС, противоположную по знаку термоЭДС от спаия J_1 (рис. 9). Таким образом, для того чтобы определить неизвестную температуру T_1 , нужно знать температуру T_3 (ее можно, например, измерить другим датчиком температуры или привязать к известной температуре, погрузив J_3 в ледяную ванну).

На практике не обязательно устраивать ледяную ванну рядом с каждой термопарой. Существует несколько программных и аппаратных способов обеспечения точности измерений с помощью термопар, из которых наибольшее распрост-

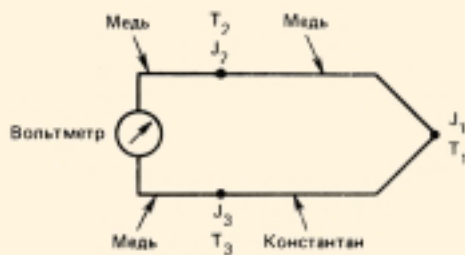


Рис. 8. Непосредственное подключение вольтметра к термопаре

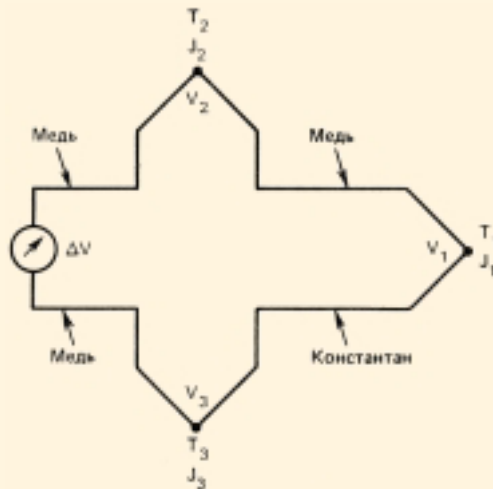


Рис. 9. Эквивалентная схема подключения

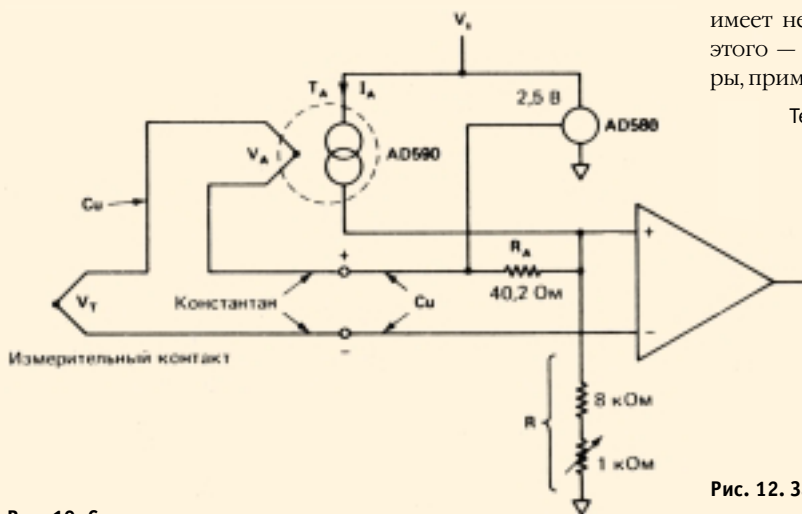


Рис. 10. Схема компенсации холодного спая

ранение получил метод схемы компенсации холодного спая (в англоязычной литературе — CJC). Суть его заключается во введении в измерительную цепь источника напряжения с ЭДС равной по величине и противоположной по знаку термоЭДС контакта J_3 (рис. 10). Разумеется, эта ЭДС должна также зависеть от температуры окружающего воздуха, поэтому, как правило, частью такого источника является интегральный полупроводниковый датчик температуры. В приведенной схеме использован полупроводниковый датчик AD590 и источник опорного напряжения AD580. Существуют также специальные микросхемы для подключения термопар, содержащие устройства компенсации холодного спая, усилители и схемы контроля исправности термопар. Примером, правда, несколько устаревшим, может служить микросхема AD595, типовая схема включения которой приведена на ри-

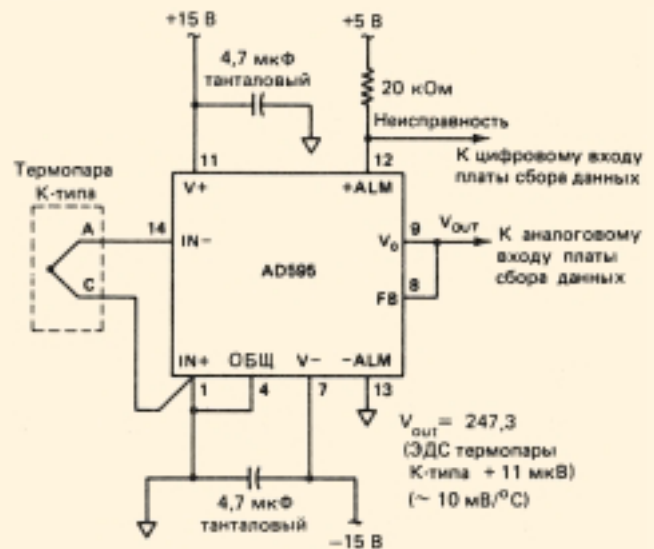


Рис. 11. Подключение термопары с помощью микросхемы AD595

сунке 11. Обычно такие устройства уже входят в состав готовых измерительных модулей и контроллеров для подключения термопар, и у пользователя не возникает необходимости создавать и настраивать их самому.

Итак, мы точно измерили термоЭДС нашей термопары. Теперь остался последний шаг: преобразовать эту термоЭДС в температуру. К сожалению, у большинства термопар зависимость термоЭДС от температуры в некоторых диапазонах имеет нелинейный характер (рис. 12). Основная причина этого — зависимость коэффициента Зеебека от температуры, примерный вид которой показан на рис. 13. Для достиже-

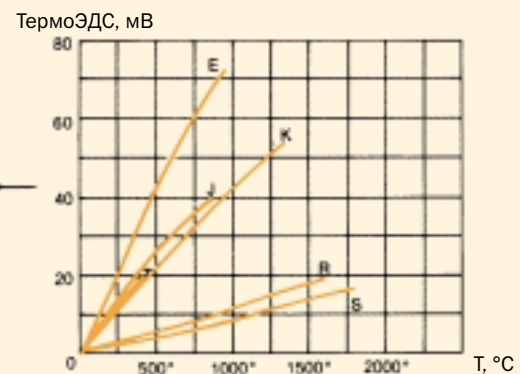


Рис. 12. Зависимость термоЭДС от температуры

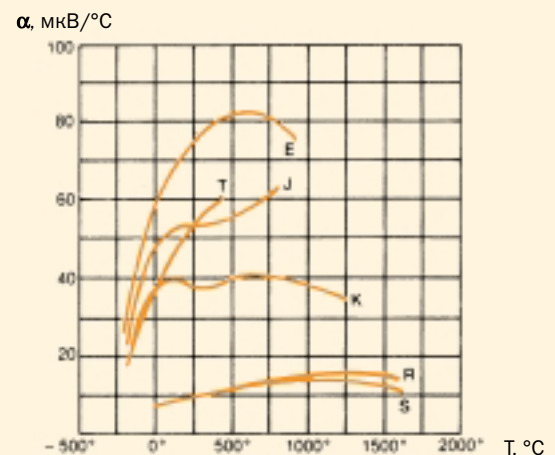


Рис. 13. Зависимость коэффициента Зеебека от температуры

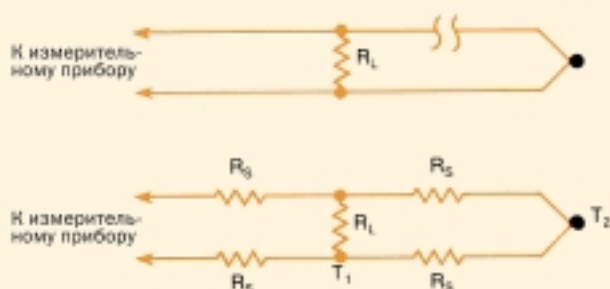


Рис. 14. Шунтирование термопары

ния высокой точности измерений термопарного термометра во всем диапазоне рабочих температур необходима его калибровка. Простейший (и, кстати, наиболее точный) метод калибровки заключается в составлении и размещении в памяти ЭВМ таблицы соответствия значений термоЭДС и температуры, измеренной с помощью образцового термометра. Единственным серьезным недостатком табличного метода является его высокая ресурсоемкость (при широком температурном диапазоне требуется очень большой объем таблицы). Наряду с табличной используется также полиномиальная аппроксимация

$$T = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + \dots + A_nX^n$$

Здесь T — температура, X — выходное напряжение термопары. Коэффициенты A_j и порядок полинома n определяются по градуировочным таблицам для каждого типа термопары.

Основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар

Среди источников погрешностей можно выделить как явления, специфичные только для термопар, так и общие (шумы и помехи), характерные для любых измерительных систем. Рассмотрим вкратце эти явления и методы их нейтрализации.

Плохой контакт в месте спая и раскалибровка

Для соединения разнородных металлов между собой чаще всего применяются пайка припоем и сварка. При температурах, близких к точке плавления припоя, возможно нарушение контакта и даже разрыв термопары (эту ситуацию можно выявить по изменению характеристик термопары). Термопары, соединенные с помощью сварки, выдерживают более высокие температуры, однако при сварке структура и химический состав проводников могут деградировать, что приводит к возникновению погрешностей. Раскалибровка термопары (возникновение несоответствия рабочей характеристики термопары калибровочному полиному) также может являться результатом химического изменения материала термоэлектродов под действием высоких температур. Чтобы уменьшить такие погрешности, можно прибегнуть к повторной калибровке или замене термопары.

Шунтирование термопары и гальванический эффект

При высоких температурах электрическое сопротивление материалов изоляционных оболочек термоэлектродов снижается и может стать меньше омического сопротивления R_S самих электродов (рис. 14). Это эквивалентно включению в цепь термопары шунтирующего резис-

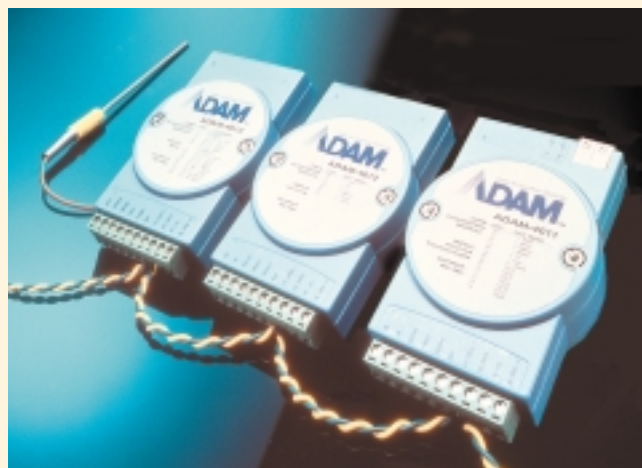


Рис. 15. Интеллектуальные модули UCO ADAM фирмы Advantech позволяют размещать контроллер на расстоянии до 1 км от термопары

тора R_L и образованию нового паразитного спая, имеющего температуру T_1 (в отличие от измеряемой T_2). Также при высоких температурах, особенно при измерении температуры жидкости, возможно образование (проникновение) электролита внутри термопары и возникновение гальванического эффекта, также приводящего к ошибкам измерения.

Шумы и помехи

Поскольку выходной сигнал термопары очень мал, необходимо принимать специальные меры для снижения уровня шумов (и соответственно погрешности измерения). Кратко остановимся на наиболее важных из них.

1. Соединительные проводники для подключения термопар должны быть изготовлены из материалов с коэффициентом Зеебека, максимально близким к материалам термопары.
2. Необходимо стремиться к максимальному сокращению длины соединительных проводников между термопарой и цифровым измерительным устройством. В случае большого удаления термопары от контроллера следует использовать располагаемые в непосредственной близости от термопары специальные модули нормализации сигналов, превращающие термоЭДС в токовый сигнал (например, 4-20 мА) или непосредственно в цифровой отсчет (рис. 15). Кроме того, эти модули, как правило, обеспечивают гальваническую развязку сигналов и содержат устройства компенсации холодного спая. Дополнительные затраты стоимости окупаются надежностью, точностью и стабильностью работы системы.
3. Как можно шире использовать экранирование термопар и соединительных проводников (рис. 16) для борьбы с помехами общего вида, особенно если проводники проходят рядом с источниками наводок и помех, а также при измерениях в электропроводящих средах.
4. Использовать фильтрацию сигналов для снижения уровня высокочастотных помех.
5. При многоканальных измерительных системах использовать метод временного отключения не используемых в данный момент групп каналов для предотвращения суммирования их шумов с сигналом измеряемого канала.

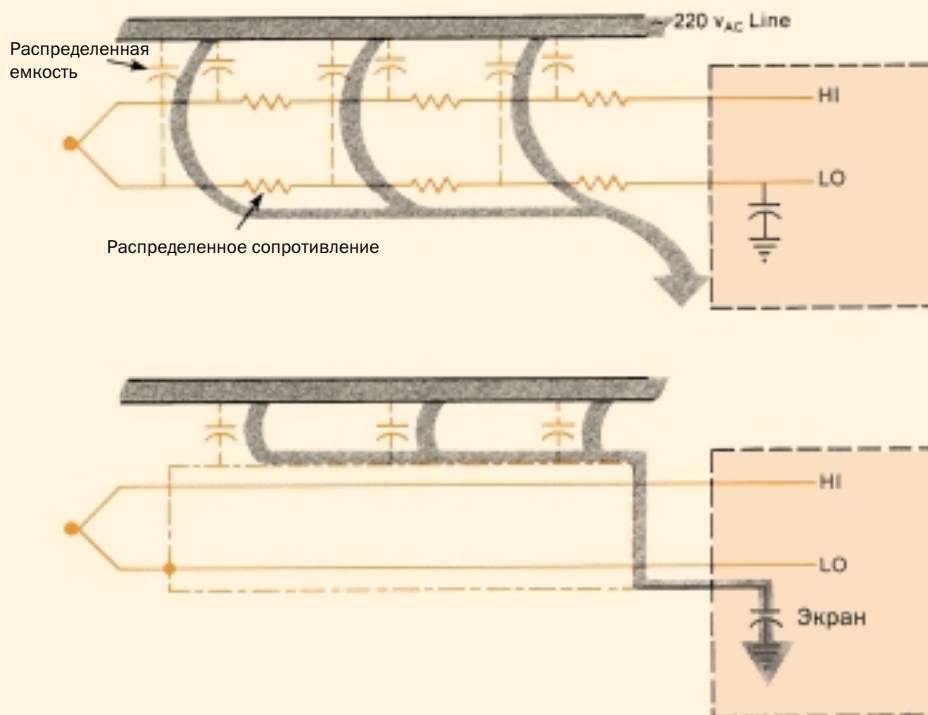


Рис. 16. Эффект экранирования термопар и соединительных проводов

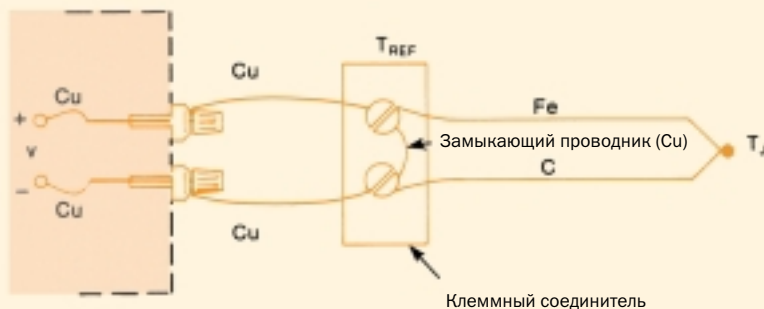


Рис. 17. Проверка исправности термопары методом закорачивания клемм

Методы дистанционной диагностики исправности термопар

Наиболее просты и удобны программные методы диагностики, в основе которых лежит протоколирование результатов измерений температуры за некоторый период времени. В частности, поскольку температура в данном технологическом процессе может меняться с конечной скоростью, любое мгновенное изменение показаний тер-



Рис. 18. Локальный нагрев термопары и изменение сопротивления

мопарного термометра, скорее всего, является признаком ошибки или отказа.

Среди аппаратных методов наибольшее распространение получили метод закорачивания термопары и метод измерения сопротивления термопары. Предположим, что термопара (железо-константан) подключена к измерительному прибору медными проводниками (рис. 17) через клеммный соединитель с известной температурой T_{REF} (как правило, это комнатная температура). В этом случае термоЭДС будет равна:

$$V = \alpha(T_J - T_{REF})$$

Если мы теперь замкнем между собой клеммы медным проводом ($V = 0$), то получим:

$$T_J = T_{REF}$$

Таким образом, при закороченной термопаре прибор должен показывать температуру клеммного соединителя T_{REF} . Этот простой тест позволяет проверить правильность работы контроллера, измерительного устройства, устройства

компенсации холодного спая, но не самой термопары. Для проверки термопары можно использовать, например, метод контроля ее омического сопротивления. В нормальном состоянии сопротивление плавно меняется с температурой. Если, например, в результате локального нагрева возникнет замыкание термопары, то сопротивление резко изменится (рис. 18), что, скорее всего, указывает на ошибку.

Краткие выводы и рекомендации

Качественные показатели системы измерения температуры с помощью термопар могут быть улучшены следующими путями.

- Используйте максимально толстые проводники, не отводящие тепло от измеряемой зоны.
- Если необходимо использовать тонкие проводники, старайтесь максимально уменьшить их длину.
- Оберегайте по возможности датчик и провода от ударов и вибраций, которые могут ухудшить параметры системы.
- При невозможности расположить преобразователь вблизи термопары используйте для подключения экранированную витую пару.
- Не подвергайте термопару резким колебаниям температуры и используйте ее и соединительные провода только в рабочем диапазоне температур.
- По возможности ведите протоколирование результатов измерений. ●

Продолжение следует