

Модуль 2 Измерительные преобразователи. Датчики температуры

План лекции

- 2.1 Измерительные преобразователи и их характеристики
- 2.2 Датчики температуры. Общие сведения
- 2.3 Термометры расширения
- 2.4 Термометры сопротивления
- 2.5 Термоэлектрические преобразователи
- 2.6 Пирометры

2.1 Измерительные преобразователи и их характеристики

Успешный контроль режимов работы технологических машин и агрегатов и протекания производственных процессов неизбежно требует наличия устройств, измеряющих различные физические величины, характеризующие эти технологические процессы или объекты. В технике, и в автоматике, в частности, такие устройства принято называть датчиками.

Отметим, что в настоящее время термин «датчик» не имеет чёткого толкования. В одних источниках под датчиком подразумевают элемент автоматики, который выполняет функции измерения контролируемых и управляемых величин, в других – измерительное устройство с дополнительным преобразователем, включаемым с целью преобразования выходного сигнала измерительного устройства в сигнал другой величины.

В связи с этим изложение материала, очевидно, целесообразнее будет начать с понимания терминов, используемых в технической среде: чувствительный элемент, датчик-реле, измерительный преобразователь, интеллектуальный датчик. Рассмотрим их подробнее.

Чувствительный элемент (sensor) – это элемент измерительной системы, на который непосредственно воздействует явление, тело или вещество, являющееся носителем величины, подлежащей измерению. Для построения чувствительных элементов используют физические явления, которые позволяют получать информацию о той или иной физической величине.

Чувствительные элементы по принципу действия разделяют на параметрические, в которых измеряемая величина воздействует на параметры чувствительного элемента (электрическое сопротивление, ёмкость, индуктивность и др.), и генераторные, преобразующие неэлектрические величины в электрическую величину (напряжение, ток). Для работы параметрического чувствительного элемента, в отличие от генераторного, необходим внешний источник питания. К параметрическим чувствительным элементам относятся реостатные, потенциометрические, электроконтактные, ёмкостные, индуктивные и фоторезисторные преобразователи, тензорезисторы, терморезисторы и др., к генераторным чувствительным элементам – термоэлектрические, индукционные и пьезоэлектрические преобразователи, фотоэлементы и др.

Датчик-реле – это элемент автоматики, предназначенный для контроля и управления (либо двухпозиционного регулирования) контролируемой физической величины – технологического параметра – путем переключения контактов электрической цепи. В современной промышленной и бытовой технике широкое распространение получили датчики-реле температуры, давления, уровня и расхода жидкостей, газов, сыпучих масс и др.

Измерительный преобразователь – это элемент измерительной системы – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований и/или передачи, но не всегда поддающийся восприятию наблюдателем оператором. Измерительный преобразователь с высокой точностью реализует функциональную зависимость между двумя физическими величинами – на входе и выходе измерительного преобразователя.

Измерительные преобразователи подразделяют на первичные, нормирующие преобразователи и вторичные (приборы). Первичный измерительный преобразователь – это чувствительный элемент, рассмотренный выше. Основное назначение нормирующего преобразователя – преобразование выходного сигнала первичного измерительного преобразователя в унифицированный (нормированный, стандартный) сигнал для последующей передачи в устройства индикации, регистрации, регулирования либо в систему сбора данных. Вторичным преобразователем (измерительным прибором) называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы могут быть показывающими, регистрирующими, сигнализирующими, регулирующими и др.

Таким образом, термин «датчик» можно считать обобщающим понятием, под которым в дальнейшем будем понимать техническое устройство, измеряющее либо контролирующее физическую величину – технологический параметр производственного процесса, режима работы машины либо агрегата и преобразующее соответствующую физическую величину в сигнал, удобный для дальнейшей обработки и передачи на расстояние или в цепь вторичного прибора.

В зависимости от рода измеряемой величины на входе первичного преобразователя различают преобразователи электрических и неэлектрических величин. Поскольку наиболее просто измерению поддаются электрические величины, то в большинстве случаев при измерении неэлектрических величин используются датчики, обеспечивающие преобразование соответствующих неэлектрических величин в электрическую (напряжение, ток, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др.).

Датчики чрезвычайно разнообразны по принципу действия, конструкции, видам входного и выходного сигналов, функциональному назначению,

метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Характеристики датчиков, как и других средств измерений, делятся на две группы: преобразовательные и метрологические.

Преобразовательные (технические) характеристики – это характеристики, устанавливающие связь между входной и выходной величинами. К ним относятся функции преобразования (градуировочные характеристики), коэффициенты преобразования, чувствительность, диапазон преобразования, порог чувствительности и др.

Метрологические характеристики – это характеристики, нормирующие точностные параметры (погрешности) средств измерения.

В зависимости от режима работы как преобразовательные, так и метрологические характеристики разделяют на статические и динамические.

Состояние и режим работы датчика, при которых значения входного X и выходного Y сигналов не изменяются, называются статическими. Статическая характеристика – это зависимость выходной величины датчика от входной физической величины в статическом режиме, когда каждому значению входной величины соответствует определенное значение выходной. Статическая характеристика в общем случае описывается некоторым нелинейным уравнением $Y=f(X)$. Для датчиков и измерительных приборов с неименованной шкалой статическую характеристику принято называть функцией преобразования.

Определение статической характеристики связано с выполнением градуировки, поэтому для всех средств измерений используют понятие градуировочной характеристики, под которой понимают зависимость между значениями величин на выходе и входе датчика, составленную в виде таблицы, графика или формулы.

На рисунке 2.1 показаны различные виды статических характеристик измерительных устройств.

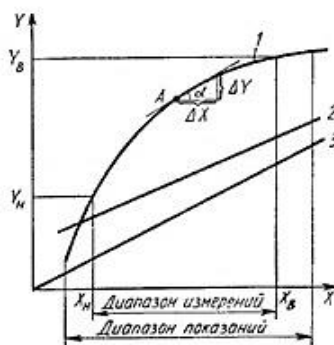


Рисунок 2.1 – Статическая характеристика измерительного устройства*

Наиболее приемлемой статической характеристикой для большинства датчиков является линейная характеристика. Для линеаризации характеристик датчиков, которые могут быть представлены аналитическими (гладкими) нелинейностями, используются усилители-линеаризаторы. Наряду с линейными широкое распространение нашли датчики с различными видами нелинейных характеристик (релейных, с зоной нечувствительности,

с ограничением по амплитуде и др.).

Кроме статической характеристики для определения метрологических свойств датчика используется также диапазон измерений или рабочий диапазон преобразования – область значений измеряемой величины, для которой нормирована допускаемая погрешность, и диапазон показаний – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы. Диапазон измерений характеризуется верхним и нижним пределами измерений. В частном случае диапазоны измерений и показаний могут совпадать.

Стабильность (воспроизводимость) датчика – это свойство отсчетного устройства обеспечивать постоянство показаний одной и той же величины. Со временем в результате старения материалов стабильность показаний датчика может нарушаться. Стабильность прибора определяется вариацией показания. Поэтому при установлении стабильности нормируют величину допускаемой вариации. В свою очередь под вариацией показаний принято понимать разность показаний датчика (прибора) в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Под чувствительностью (крутизной) измерительного преобразователя подразумевают отношение приращения выходного сигнала ΔY средства измерений к вызывающему это приращение изменению входного сигнала ΔX :

$$S_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}$$

Широко используется понятие порога чувствительности (разрешающей способности, порога реагирования) датчика, под которым понимают минимальное изменение входной величины, вызывающее заметно различимое изменение выходного сигнала.

Практически все измерительные преобразователи представляют собой инерционные элементы, что приводит к тому, что в динамическом режиме мгновенное значение выходного сигнала зависит не только от мгновенного значения входного сигнала, но и любых изменений этого сигнала, т.е. от его первой и второй производных и производных более высокого порядка. Инерционные свойства датчиков определяют динамическими характеристиками.

Динамическая характеристика описывает во времени поведение датчика при изменениях входной величины в динамическом режиме и определяется внутренней структурой датчика и его элементов. Динамические свойства датчика принято описывать дифференциальным уравнением, могут быть определены характеристиками, используемыми в теории автоматического управления: передаточной функцией, переходной, импульсно-переходной (весовой), амплитудно-частотной, амплитудно-фазовой характеристиками и др.

Передаточную функцию $W(p)=Y(p)/X(p)$ можно рассматривать как коэффициент преобразования датчика в динамическом режиме.

Передаточная функция, как и дифференциальное уравнение, является исчерпывающей характеристикой инерционных свойств измерительного устройства. Она позволяет определять реакцию измерительного устройства на входные сигналы, изменяющиеся во времени по любому закону.

Передаточную функцию удобно использовать при анализе работы датчиков в автоматических системах регулирования, определяют ее обычно через переходную характеристику, последняя определяет реакцию (изменение во времени выходного сигнала) измерительного преобразователя на появление на его входе скачкообразного сигнала, равного по значению единице входной величины.

Импульсно-переходная (весовая) функция определяет реакцию датчика на входной сигнал в виде единичного импульса $\delta(t)$ (дельта-функция П.Дирака).

Для определения инерционных свойств датчиков по переходным характеристикам обычно используют понятие динамического звена. Переходные характеристики и передаточные функции типовых динамических звеньев известны, что позволяет по форме переходной характеристики измерительного преобразователя отождествить его с соответствующим типовым динамическим звеном и, следовательно, определить передачную функцию датчика. Описанную процедуру принято называть идентификацией.

Быстродействие – это параметр датчика, позволяющий оценить, как его выходная величина следует во времени за изменяющейся измеряемой величиной. Для количественного описания быстродействия используется время установления выходного сигнала или показаний (время реакции) – интервал времени, который должен пройти после ступенчатого изменения входной физической величины для того, чтобы сигнал на выходе датчика достиг значения, при котором разность между действительным текущим значением входной величины и показанием датчика не превышала бы его допустимой погрешности. Иными словами оно определяет отрезок времени, необходимый для завершения переходного процесса при скачкообразном изменении входного сигнала.

Как известно, по форме представления принято различать абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерительных преобразователей. Для датчиков, в качестве класса точности, обычно используется приведенная погрешность – отношение абсолютной погрешности измерительного преобразователя к нормирующему значению, выраженное в процентах. В качестве нормирующего значения обычно используется верхний предел диапазона измерений.

В зависимости от условий применения измерительных преобразователей принято различать основную и дополнительную составляющие инструментальной погрешности. Как правило, инструментальная погрешность имеет определяющее значение для наиболее распространенных технических измерений.

Основной погрешностью датчика называют максимальную разность между получаемой в нормальных условиях эксплуатации величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемым по статической характеристике для данной входной величины. За нормальные условия эксплуатации принимают, как правило, следующее состояние окружающей среды: температура $+25 \pm 10$ °С; атмосферное давление 105 ± 4000 Па; относительная влажность 65 ± 15 %; вибрации, электрические и магнитные поля должны отсутствовать.

Основная погрешность выражается как в абсолютных, так и относительных единицах. Для наиболее распространенных типов датчиков статические характеристики стандартизируются с указанием допустимых отклонений статических характеристик от номинальных значений.

Дополнительные погрешности датчика – это погрешности, вызываемые изменениями внешних условий по сравнению с нормальными эксплуатационными условиями. Дополнительные погрешности выражаются обычно в процентах, отнесенных к изменению вызвавшего их фактора. Так, температурная погрешность датчика может составлять 0,15 % на 1 °С.

Для рассмотрения зависимости погрешности датчиков от значения измеряемой величины удобно использовать понятие номинальной и реальной функций преобразования измерительного преобразователя.

Номинальной (или идеальной) функцией преобразования называют функцию преобразования, которая приписана измерительному преобразователю данного типа, указана в его паспорте (инструкции по эксплуатации) и используется при выполнении с его помощью измерений.

Реальной функцией преобразования (рисунок 2) называют ту функцию преобразования, которой обладает конкретный экземпляр измерительного преобразователя данного типа.

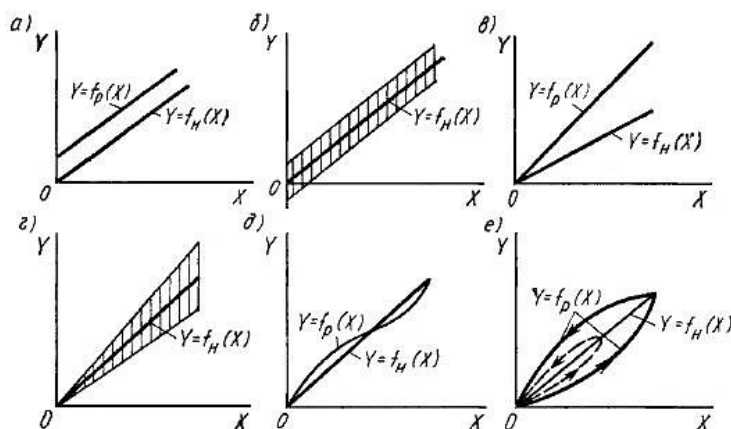


Рисунок 2.2 – Реальные функции преобразования датчиков*

Из-за несовершенства конструкции и технологии изготовления реальная функция преобразования датчика отличается от номинальной. Это отличие и определяет погрешность данного измерительного преобразователя. Отклонения реальной характеристики от номинальной зависят от значения

измеряемой величины. По этому признаку погрешности принято разделять на аддитивную, мультипликативную, линейности и гистерезиса.

Аддитивной (получаемой путем сложения) называют погрешность, которая остается постоянной при всех значениях измеряемой величины. На рисунке 2.2,а показано, что реальная функция преобразования $Y=f_p(X)$ несколько смещена относительно номинальной $Y=f_n(X)$, т. е. выходной сигнал измерительного преобразователя при всех значениях измеряемой величины X будет больше (или меньше) на одну и ту же величину, чем он должен быть в соответствии с номинальной функцией преобразования. Возникновение случайной аддитивной погрешности обычно вызвано трением в опорах, контактными сопротивлениями, дрейфом нуля, шумом или фоном измерительного устройства.

Мультипликативной (получаемой путем умножения), или погрешностью чувствительности измерительных устройств, называют погрешность, которая линейно возрастает (или убывает) с увеличением измеряемой величины. Графически появление мультипликативной погрешности интерпретируется поворотом реальной функции преобразования относительно номинальной (рисунок 2.2,в). Если мультипликативная погрешность является случайной, то реальная функция преобразования представляется полосой, показанной на рисунке 2.2,г. Причиной возникновения мультипликативной погрешности обычно является изменение коэффициентов преобразования отдельных элементов и узлов измерительных преобразователей.

На рисунке 2.2,д показано взаимное расположение номинальной и реальной функций преобразования измерительного устройства в случае, когда отличие этих функций вызвано нелинейными эффектами. Если номинальная функция преобразования линейная, то вызванную таким расположением реальной функции преобразования систематическую погрешность называют погрешностью линейности. Причинами данной погрешности могут быть особенности конструкции (схемы) датчика и/или нелинейные искажения функции преобразования, связанные с несовершенством технологии производства.

Наиболее существенной и трудноустранимой систематической погрешностью измерительных преобразователей является погрешность гистерезиса, или погрешность обратного хода, выражающаяся в несовпадении реальной функции преобразования измерительного устройства при увеличении (прямой ход) и уменьшении (обратный ход) измеряемой величины (рисунок 2.2,е). Причинами гистерезиса могут являться: люфт и сухое трение в механических передающих элементах, гистерезисный эффект в ферромагнитных материалах, внутреннее трение в материалах пружин, явление упругого последействия в упругих чувствительных элементах, явление поляризации в электрических, пьезоэлектрических и электрохимических элементах и др. Существенным при этом является то, что форма получаемой петли реальной функции преобразования зависит от предыстории, а именно от значения измеряемой

величины, при котором, после постепенного увеличения последней, начинается ее уменьшение (рисунок 2.2,е).

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

2.2 Датчики температуры. Общие сведения

Одним из самых распространенных технологических параметров, встречающихся в промышленности, является температура. По применяемым свойствам рабочих веществ и материалов датчики температуры достаточно разнообразны. Практически все технологические процессы и различные свойства вещества зависят от температуры. В отличие от таких физических величин, как длина, масса и др. температура является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Так, если разделить на две равные части однородное тело, то его масса делится пополам. Температура, являющаяся интенсивной величиной, таким свойством аддитивности не обладает, т. е. для системы, находящейся в термическом равновесии, любая микроскопическая часть системы имеет одинаковую температуру. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобном тому, как создаются эталоны экстенсивных величин – массы, длины, электрического сопротивления и т. п.

Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Такие свойства тел называют термометрическими, к ним относят длину, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление, а вещества, характеризующиеся термометрическими свойствами, называют термометрическими.

Из того, что температура – это кинетическая энергия молекул, ясно, что наиболее естественно измерять ее в энергетических единицах (в системе СИ – в Дж). Однако измерение температуры началось задолго до создания молекулярно-кинетической теории, поэтому практические шкалы измеряют температуру в условных единицах – градусах.

В таблице 1 приведены наиболее известные практические температурные шкалы и формулы для взаимного перевода единиц измерения.

В термодинамике используется шкала Кельвина, в которой температура отсчитывается от абсолютного нуля (состояние, соответствующее минимальной теоретически возможной внутренней энергии тела), а 1 кельвин равен $1/27316$ части расстояния от абсолютного нуля до тройной точки воды (состояния, при котором лед, вода и водяной пар находятся в равновесии).

Для пересчета кельвинов в энергетические единицы служит постоянная Больцмана. Используются также производные единицы: килокельвин, мегакельвин, милликельвин и т. д.

Таблица 2.1

Таблица перевода единиц температурных шкал

Шкала	Условное обозначение	из Цельсия (°C)	в Цельсий
Фаренгейт	(°F)	$[^{\circ}\text{F}] = [^{\circ}\text{C}] \times 9/5 + 32$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{F}] - 32) \times 5/9$
Кельвин	(K)	$[K] = [^{\circ}\text{C}] + 273.15$	$[^{\circ}\text{C}] = [K] - 273.15$
Ранкин (Rankin)	(°R)	$[^{\circ}\text{R}] = ([^{\circ}\text{C}] + 273.15) \times 9/5$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{R}] - 491.67) \times 5/9$
Делиль (Delisle)	(°Д или °De)	$[^{\circ}\text{De}] = (100 - [^{\circ}\text{C}]) \times 3/2$	$[^{\circ}\text{C}] = 100 - [^{\circ}\text{De}] \times 2/3$
Ньютон (Newton)	(°N)	$[^{\circ}\text{N}] = [^{\circ}\text{C}] \times 33/100$	$[^{\circ}\text{C}] = [^{\circ}\text{N}] \times 100/33$
Реомюр (Réaumur)	(°Re, °Ré, °R)	$[^{\circ}\text{Ré}] = [^{\circ}\text{C}] \times 4/5$	$[^{\circ}\text{C}] = [^{\circ}\text{Ré}] \times 5/4$

До сих пор в промышленности используется шкала Цельсия, в которой за 0 принимают точку замерзания воды, а за 100° точку кипения воды при атмосферном давлении. Поскольку температура замерзания и кипения воды недостаточно хорошо определена, в настоящее время шкалу Цельсия определяют через шкалу Кельвина: градус Цельсия равен кельвину, абсолютный ноль принимается за -273,15 °C.

В Англии и США используется шкала Фаренгейта, предложенная Г.Фаренгейтом в 1724 г. В этой шкале на 100 градусов разделен интервал от температуры самой холодной зимы в городе, где он жил, до средней нормальной температуры человеческого тела (36,6 °C ±0,7 °C, или 98,2 °F ±1,3 °F). В настоящее время принято следующее определение шкалы Фаренгейта: это температурная шкала, 1 градус которой (1 °F) равен 1/180 разности температур кипения воды и таяния льда при атмосферном давлении, а точка таяния льда имеет температуру +32 °F.

Шкала Реомюра, предложенная им в 1730 г. во Франции, в настоящее время почти вышла из употребления. Единица шкалы – градус Реомюра (°R), 1 °R равен 1/80 части температурного интервала между опорными точками – температурой таяния льда (0 °R) и кипения воды (80 °R).

Реализация термодинамической шкалы на практике требует проведения значительного числа экспериментов, поэтому на основе международных соглашений была принята эмпирическая, относительно легко воспроизводимая шкала – Международная практическая температурная шкала. В настоящее время действует введенная в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам, т. н. Международная температурная шкала МТШ-90 (ITS-90), которая приближается к термодинамической шкале Кельвина.

В зависимости от типа используемого термопреобразователя различают термометры расширения, термометры сопротивления, термоэлектрические преобразователи и пирометры излучения.

В таблице 2.2 приведены наиболее распространенные средства измерения температуры, получившие широкое применение в различных областях промышленности.

Таблица 2.2

Наиболее распространенные измерительные преобразователи температуры

Термометрическое свойство	Наименование средства	Диапазон измерений, °C
Расширение и сжатие твердых тел в зависимости от их собственной	Термобиметаллические пластины	-60...+350
	Дилатометрические реле	-60...+500
Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме	Манометрические термометры:	
	газовые	-200...+800
	жидкостные	-150...+400
Термометрическое свойство	конденсационные	-50...+300
	Наименование средства	Диапазон измерений, °C
Изменение электрического сопротивления	Металлические термометры сопротивления	-250...+1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-150...+450
Термоэлектрический эффект (термоЭДС)	Термоэлектрические преобразователи	-200...+2200
Тепловое излучение	Пирометры излучения:	
	квасимонохроматические спектрального отношения радиационные	+700...+6000 +1400...+2800 +50...+3500

2.3 Термометры расширения

Процесс теплового расширения вещества происходит по закону Гей-Люссака и описывается уравнением

$$\Delta A = A_2 - A_1 = A_1 \alpha \Delta \vartheta,$$

где A_1 и A_2 – размеры нагреваемого тела при температурах ϑ_1 и ϑ_2 ;

α – коэффициент теплового расширения.

Термометры расширения подразделяются на стеклянные жидкостные, биметаллические, дилатометрические и манометрические.

Принцип действия *стеклянных жидкостных термометров* основан на расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре. Стеклянные термометры подразделяют на термометры с вложенной шкалой и палочные. Термометр с вложенной шкалой состоит из стеклянного резервуара и припаянного к нему стеклянного капилляра, вдоль которого расположена шкала; палочный термометр – из толстостенного капилляра, к которому припаян резервуар. Шкала палочного термометра наносится на наружной поверхности капилляра. В качестве термометрической жидкости

используются ртуть, толуол, этанол, керосин, пентан.

Среди жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные. Химически чистая ртуть как термометрическое вещество имеет ряд достоинств: она остается жидкостью в широком интервале температур, не смачивает стекло, ее легко получить в чистом виде. Однако ртуть имеет относительно малый коэффициент объемного расширения, что требует изготовления термометров с тонкими капиллярами. В связи с тем, что температура кипения ртути при атмосферном давлении значительно меньше верхнего предела ее применения, в термометрах, предназначенных для измерения высоких температур, капилляр над ртутью заполняют азотом. Для предотвращения образования паров ртути давление азота должно быть большим. Так, для термометров с верхним пределом применения 600 °С давление азота составляет 3 МПа.

Достоинствами стеклянных жидкостных термометров являются высокая точность измерения, простота устройства и низкая стоимость, недостатками – относительно плохая видимость шкалы, невозможность передачи показаний на расстояние и автоматической их регистрации.

Принцип работы *биметаллического термометра* (рис. 2.3) основан на расширении и сжатии твердых тел в зависимости от их собственной температуры.

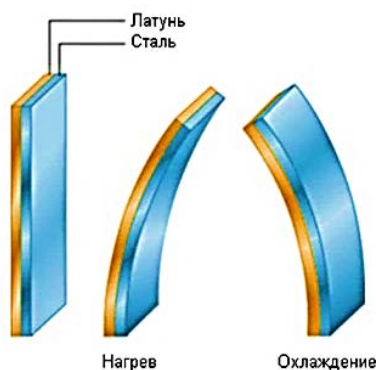


Рисунок 2.3 – Биметаллический преобразователь*

Конструктивно биметаллический элемент представляет собой пластину, скатанную методом холодной прокатки из двух полос из металлов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. При изменении температуры биметаллического элемента и окружающей среды сам элемент деформируется, при этом степень его деформации пропорциональна температуре.

Прочность и неприхотливость биметаллических термометров делает их приемлемыми для промышленного применения в качестве как измерительных преобразователей, так и электроконтактных датчиков-реле. Причем в последнем случае датчики на их основе позволяют контролировать не только температуру, но и косвенно силу протекающего через них тока. Такие элементы широко применяются в автоматических выключателях, реле максимального тока и т. п.

В качестве материалов для биметаллических преобразователей чаще всего используются *латунь* (сплав меди и цинка) и *инвар* (сплав железа и никеля).

Диапазон рабочих температур биметаллических датчиков и измерительных преобразователей лежит в пределах от -60 до +350 °С.

Биметаллический термометр ТБ-Э-100/150 производства группы компаний «Теплоприбор» (г. Москва, Россия), представленный на рисунке 2.4, обеспечивает управление внешними электрическими цепями от сигнализирующего устройства прямого действия путем включения или выключения контактов в схемах сигнализации, автоматики и блокировки технологических процессов.



Рисунок 2.4 – Электроконтактные биметаллические термометры ТБ-Э-100/150*

Биметаллический термометр с электроконтактами ТБ-Э-100/150 предназначен для измерения температуры жидких и газообразных сред. Чувствительный элемент – биметаллическая спиральная пружина. Предельные общие диапазоны измерения: -50...+600 °С. Класс точности – 1,0 %.

Сходный с биметаллическим преобразователем по принципу действия *дилатометрический термометр* выполняется в виде металлической трубки с большим температурным коэффициентом линейного расширения и стержня (например, фарфорового) с малым коэффициентом расширения, расположенного по оси трубки и закрепленного жестко на одном из ее концов.

Разность перемещений концов трубки и стержня, вызванная изменением температуры, воспринимается рычажно-зубчатой системой и передается на отсчетное устройство. Чувствительность дилатометрических преобразователей, как правило, на порядок ниже биметаллических. В связи с этим дилатометрические преобразователи обычно используются в качестве датчиков-реле (двухпозиционных терморегуляторов) для регулирования температуры жидких и газообразных сред в системах автоматического контроля и регулирования АСУ ТП в различных отраслях промышленности. Так, дилатометрический терморегулятор ТУДЭ-М1 (рисунок 2.5) предназначен для регулирования температуры жидких и газообразных сред в

диапазоне $-60 \dots +500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в системах автоматического контроля и регулирования при статическом давлении до 6,4 МПа.



Рисунок 2.5 – Дилатометрический терморегулятор ТУДЭ-М1 (Россия)*

Конструктивно манометрические термометры (рисунок 2.6) представляют собой герметичную систему, состоящую из баллона 1, соединённого капилляром 2 с манометром. Термобаллон погружается в измеряемую среду. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне происходит изменение давления во всей замкнутой системе, которое через капиллярную трубку 2 передается на манометр. Действие пружинных манометров основано на измерении величины деформации упругого чувствительного элемента – одновитковой трубчатой пружины 3, которое преобразуется передаточным механизмом 5-7 в угловое перемещение указателя по шкале прибора.

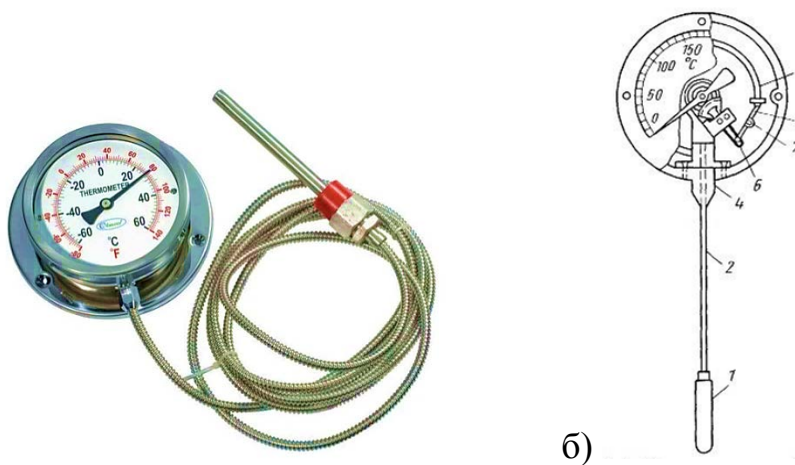


Рисунок 2.6 – Конструкция манометрического термометра*

Наиболее широко применяются приборы (манометры, вакуумметры, мановакуумметры и дифманометры) с одновитковой трубчатой пружиной Бурдона. Основная деталь прибора с одновитковой трубчатой пружиной – согнутая по дуге окружности трубка эллиптического или плоскоовального сечения (рисунок 2.6, б). Одним концом трубка заделана в держатель 4, оканчивающийся ниппелем с резьбой для присоединения к полости, в которой измеряется давление. Внутри держателя есть канал, соединяющийся с внутренней полостью трубки.

В зависимости от применяемого рабочего вещества различают манометрические термометры: газовые, конденсационные и жидкостные.

Газовые манометрические термометры заполняются азотом или гелием.

Диапазон измерения температур может составлять от -200 до $+800$ °С. На показания газовых манометрических термометров оказывает влияние температура капиллярной трубки, если она отличается от температуры термобаллона. Устранение погрешности достигается применением специальных компенсирующих устройств.

Жидкостные манометрические термометры заполняются ртутью, толуолом, ксилолом, метиловым или пропиловым спиртом. Диапазон измерения температур для жидкостных термометров составляет от -150 до 400 °С. Благодаря большой теплопроводности жидкости, такие термометры менее инерционны по сравнению с газовыми. Шкалы ртутных и спиртовых термометров равномерные, шкала термометра, заполненного ксилолом, неравномерная в диапазоне температур выше 120 °С.

В конденсационных манометрических термометрах применяются легкокипящие жидкости пропан, хлористый этил, этиловый эфир, ацетон, бензол и т.д. Конденсационные манометрические термометры обладают высокой чувствительностью. Шкалы термометров не равномерны в связи с нелинейной зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Диапазон измерения температур составляет от -50 до $+300$ °С.

Важное достоинство таких термометров – возможность использования их на взрывоопасных объектах. К недостаткам относят необходимость частой проверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также большие размеры термобаллона для газовых манометрических термометров.

Манометрические электроконтактные термометры предназначены для измерения температуры воды, масла и других неагрессивных жидкостей и управления внешними электрическими цепями от сигнализирующего устройства. На рисунке 2.7 приведена принципиальная схема манометрического показывающего электроконтактного термометра типа ТКП-100Эк. Такими приборами можно обеспечить двухпозиционное регулирование температуры в диапазонах $-25...+75$; $0...120$; $100...200$; $200...300$ °С и с классом точности 1,5 либо 2,5.

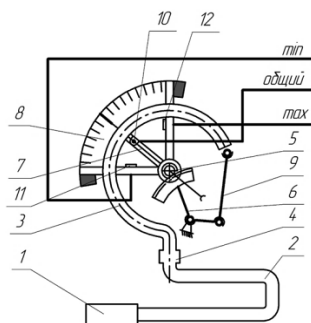


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема термометра ТКП-100Эк*:

- 1 – термобаллон; 2 – соединительный капилляр; 3 – манометрическая пружина;
4 – держатель; 5 – ось; 6 – сектор; 7 – стрелка; 8 – циферблат; 9 – тяга; 10 – ведущий поводок; 11 – контакт «минимум»; 12 – контакт «максимум»

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

2.4 Термометры сопротивления

Принцип действия *термометров сопротивления* основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры.

В СССР распространение получили металлические термометры сопротивления (ТС; *RTD – Resistance Temperature Detector*), выполненные из медной и платиновой проволоки. Стандартные *платиновые терморезисторы* применяют для измерения температуры в диапазоне от -260 до $+1100$ °С; *медные терморезисторы* – в диапазоне от -200 до $+200$ °С (ГОСТ 6651-78). Существуют также низкотемпературные платиновые терморезисторы (ГОСТ 12877-76), применяемые для измерения температуры в пределах от -261 до -183 °С. Помимо платины и меди для изготовления термопреобразователей сопротивления используют также *никель* (в странах дальнего зарубежья).

На рис. 2.8, а показано устройство чувствительного элемента платинового термометра сопротивления (а) и внешний вид защитного корпуса (б).

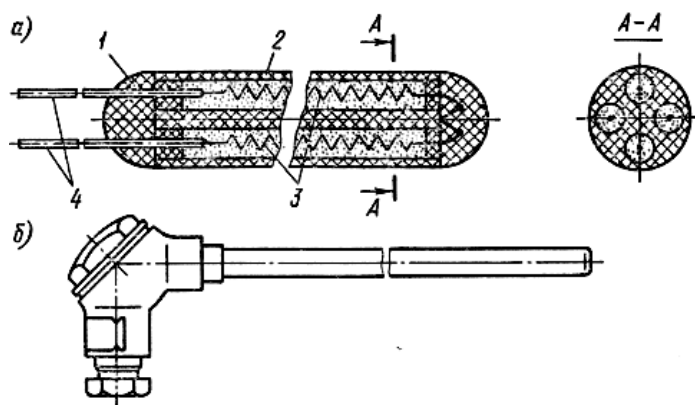


Рисунок 2.8 – Устройство и внешний вид защитного корпуса платинового термометра сопротивления*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В каналах керамической трубки 2 расположены две (или четыре) секции спирали 3 из платиновой проволоки, соединенные между собой последовательно. К концам спирали припаивают выводы 4, используемые для включения терморезистора в измерительную цепь. Крепление выводов и герметизацию керамической трубки производят глазурью 1. Каналы трубки засыпают порошком безводного оксида алюминия, выполняющим роль изолятора и фиксатора спирали. Порошок безводного оксида алюминия, имеющий высокую теплопроводность и малую теплоемкость, обеспечивает хорошую передачу теплоты и малую инерционность терморезистора. Для защиты терморезистора от механических и химических воздействий внешней среды его помещают в защитный электроизоляционный корпус (рис. 2.8, б) из нержавеющей стали.

Для медных терморезисторов зависимость сопротивления от температуры выражается уравнением

$$R=R_0 \cdot (1+\alpha t) \quad \text{при } -50^\circ\text{C} \leq t \leq +180^\circ\text{C},$$

где R_0 – сопротивление при $t=0^\circ\text{C}$; $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Для платиновых –

$$R=R_0 \cdot [1+A t+B t^2] \quad \text{при } 0^\circ\text{C} \leq t \leq +650^\circ\text{C},$$

где $A=3,968 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B=5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; $C=-4,22 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.

На рис. 2.9 приведены номинальные статические характеристики (НСХ) платинового ($Pt100$) и медных ($TSM50$ и $TSM100M$) терморезисторов.

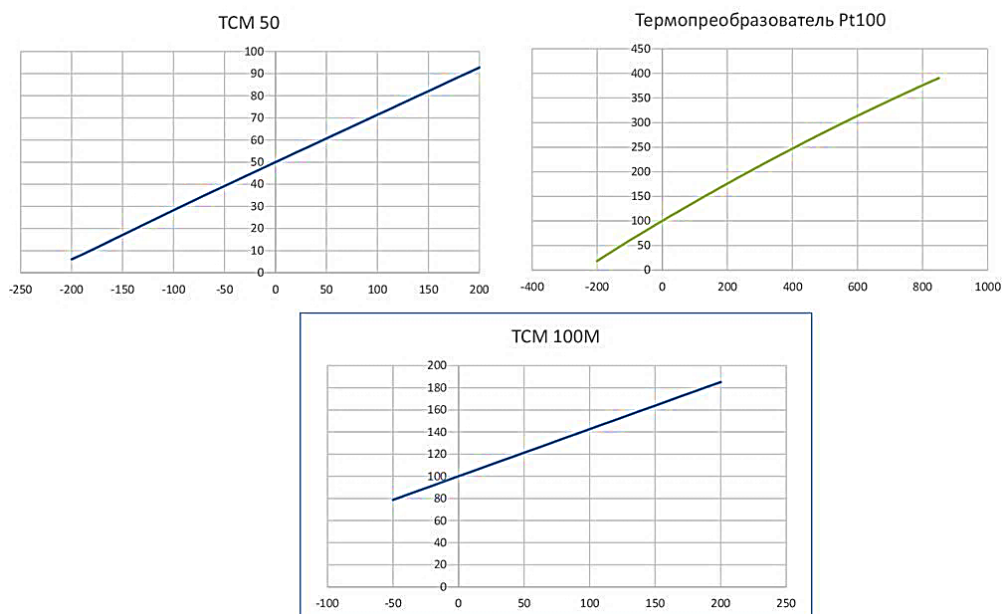


Рисунок 2.9 – НСХ термометров сопротивления*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Платина считается наилучшим материалом для термометров сопротивления, поскольку относительно легко выделяется в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления и высокое удельное сопротивление. Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в широком диапазоне температур и используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термометров. С помощью последних осуществляется воспроизведение температур в 12-ти реперных (основных фиксированных) точек (из 18-ти утвержденных по состоянию на 2017 г.) МТШ-90 в диапазоне от 13,18 до 903,89 К. Таким образом, платиновый термометр сопротивления является основным интерполяционным прибором МТШ-90.

Термометр сопротивления, как правило, представляет собой терморезистор, включенный в измерительную цепь, которой в большинстве

случаев является уравнивающий или неравносильный измерительный мост. Терморезистор может быть включен в мост по двухпроводной или трехпроводной схеме. Для уменьшения погрешности от изменения сопротивления соединительных проводов применяют трехпроводную схему (рис. 2.10).

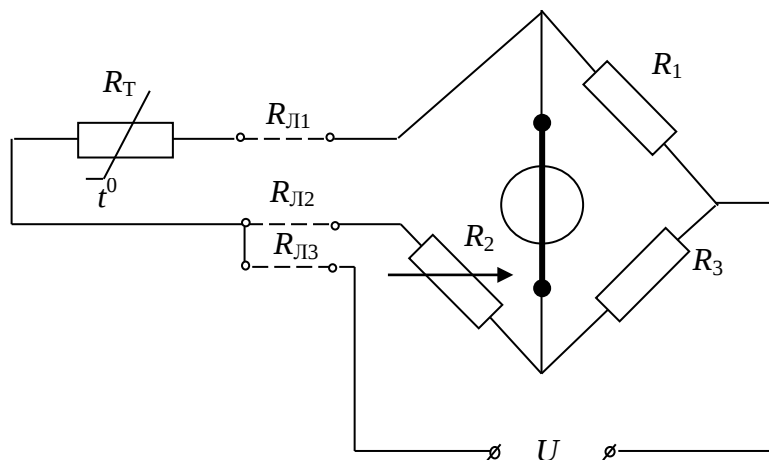


Рисунок 2.10 – Трехпроводная схема измерительного моста термометра сопротивления*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В этой схеме два провода включены в соседние плечи моста, а третий – в диагональ питания. При работе этой цепи в равновесном режиме и при условии, что $R_1 = R_3$, а $R_{Л1} = R_{Л2}$, погрешность от изменения сопротивления проводов отсутствует. При работе же в неравновесном режиме погрешность значительно меньше, чем при двухпроводной схеме включения.

Для измерения температуры с помощью стандартных медных и платиновых терморезисторов промышленность выпускает автоматические мосты классов точности 0,25; 0,5.

На рис. 2.11 приведены схема включения (с выходным сигналом 0÷5 мА) и внешний вид датчика температуры с унифицированным токовым выходным сигналом (со встроенным нормирующим преобразователем) Метран ТСМУ-274 (-276) российской компании Метран.

Термопреобразователи ТСМУ Метран-274-Ех (с НСХ 50М либо 100М), ТСМУ Метран-276-Ех (с НСХ Pt100) могут применяться во взрывоопасных зонах, в которых возможно образование взрывоопасных смесей газов, паров, горючих жидкостей и предназначены для измерения температуры нейтральных и агрессивных сред с пределом допускаемой основной приведенной погрешности $\pm 0,25$; $\pm 0,5$ и $\pm 1,0$ %. Пределы преобразуемых диапазонов температуры – от -50 до $+500$ °С. Выходной сигнал – 0-5 мА либо 4-20 мА в зависимости от напряжения питания (соответственно 36 В либо 18...42 В).

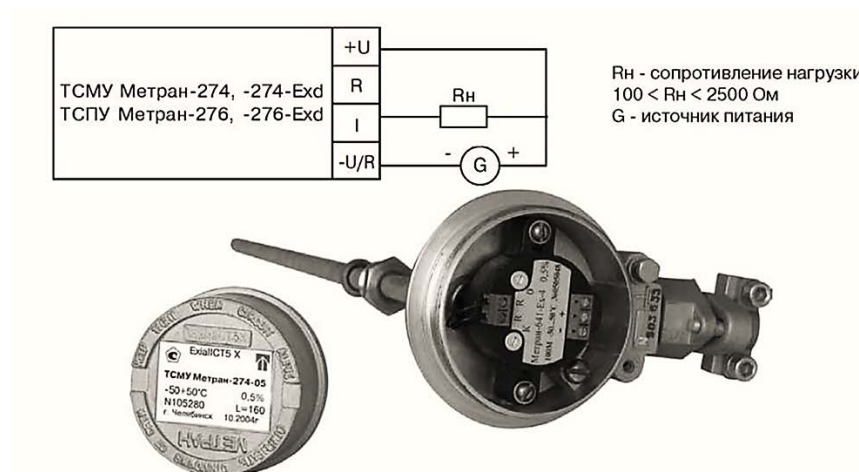


Рисунок 2.11 – Термометр сопротивления Метран ТСМУ-274 (-276)*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Резистивный элемент терморезистора изготавливают методом порошковой металлургии из оксидов, галогенидов, халькогенидов некоторых металлов, в различном конструктивном исполнении, например, в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок, тонких пластинок, и размерами от 1÷10 микрон до нескольких сантиметров.

В промышленности широко применяются полупроводниковые терморезисторы различных типов, которые характеризуются большой чувствительностью (температурный коэффициент сопротивления ТКС термисторов отрицательный и при 20 °C в 10÷15 раз превышает ТКС меди и платины) и имеют более высокие сопротивления (до 1 МОм) при весьма малых размерах.

По типу зависимости сопротивления от температуры различают терморезисторы с отрицательным (NTC-термисторы – *Negative Temperature Coefficient*) и положительным (PTC-термисторы – *Positive Temperature Coefficient* или позисторы) температурным коэффициентом сопротивления. Для позисторов с ростом температуры растёт их сопротивление; для NTC-термисторов увеличение температуры приводит к падению их сопротивления.

Терморезисторы с отрицательным ТКС (NTC-термисторы) изготавливают из смеси поликристаллических оксидов переходных металлов (например, MnO, CoOx, NiO и CuO), полупроводников типа AIII BV, стеклообразных, легированных полупроводников (Ge и Si), и других материалов. PTC-термисторы изготавливают из твёрдых растворов на основе BaTiO₃, что даёт положительный ТКС. На рис. 2.12 представлены зависимости сопротивления полупроводниковых терморезисторов от температуры.

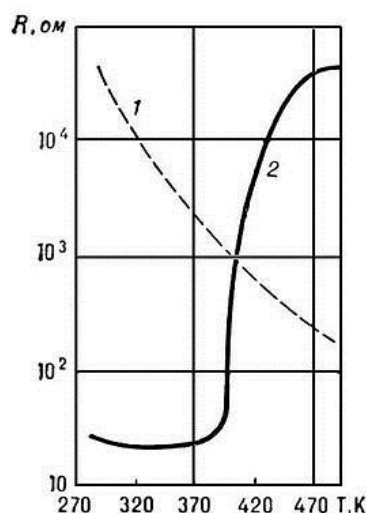


Рисунок 2.12 – Зависимости сопротивления полупроводниковых терморезисторов от температуры: 1 – термистора; 2 – позистора*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Термисторы используются в диапазоне температур от -60 до $+120$ °С.

$$R = R_0 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_0} \right) \right],$$

где R и R_0 – сопротивления терморезистора при температурах соответственно t и t_0 ;

t_0 – начальная температура рабочего диапазона;

B – коэффициент преобразования.

Режим работы терморезисторов зависит от выбранной рабочей точки на вольт-амперной характеристике (ВАХ) прибора. В свою очередь ВАХ зависит от приложенной к прибору температуры и конструктивных особенностей терморезистора.

Терморезисторы с рабочей точкой, выставленной на линейном участке ВАХ, используются для контроля за изменением температуры и компенсации параметров (электрическое напряжение или электрический ток) электрических цепей, возникших вследствие изменения температуры. Терморезисторы с рабочей точкой, выставленной на нисходящем участке ВАХ (с «отрицательным сопротивлением») применяются в качестве пусковых реле, реле времени, в системах измерения и контроля мощности электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах (или СВЧ), системах теплового контроля и пожарной сигнализации, в установках регулирования расхода жидких и сыпучих сред.

Наиболее широко используются среднетемпературные терморезисторы (с температурным ТКС от $-2,4$ до $-8,4$ %/К), работающие в широком диапазоне сопротивлений (от 1 до 10^6 Ом).

Также существуют терморезисторы с небольшим положительным ТКС

(от 0,5 до 0,7 %/К), выполненные на основе кремния, сопротивление которых изменяется по закону близкому к линейному. Такие терморезисторы находят применение в системах охлаждения и температурной стабилизации режимов работы транзисторов в различных радиоэлектронных системах.

Основные недостатки полупроводниковых терморезисторов – низкая воспроизводимость и нелинейность характеристик преобразования.

2.5 Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрические преобразователи (ТЭП) работают на термоэлектрическом эффекте, открытом в 1821 г. Т. И. Зеебеком и возникающем в цепи термопары: при разности температур в точках 1 и 2 (рисунок 2.13) соединения двух разнородных проводников в цепи термопары возникает термоЭДС. Точку соединения проводников (электродов) 1 называют рабочим концом термопары, точки 2 и 2' – свободными концами. Чтобы термоЭДС в цепи термопары однозначно определялась температурой рабочего конца, необходимо температуру свободных концов поддерживать неизменной.

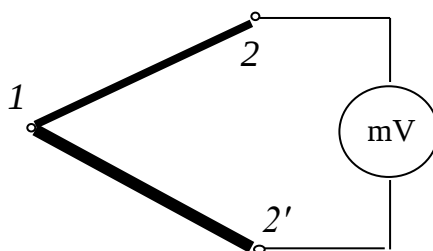


Рисунок 2.13 – Термоэлектрический преобразователь*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Возникновение термотока или термоЭДС в современной физике объясняется тем, что различные металлы обладают различной работой выхода электронов и поэтому при соприкосновении двух разнородных металлов возникает контактная разность потенциалов. Кроме того, при различии температур концов проводников в них возникает диффузия электронов, приводящая к возникновению разности потенциалов на концах. Таким образом, оба указанных фактора – контактная разность потенциалов и диффузия электронов – являются слагаемыми результирующей термоЭДС цепи, значение которой зависит в итоге от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП.

В таблице 2.3 приведены температурные диапазоны стандартных термоэлектрических преобразователей.

Для измерения высоких температур используют термопары типов ТПП, ТПР и ТВР. Термопары из благородных металлов (ТПП и ТПР) применяют при измерениях с повышенной точностью.

Таблица 2.3

Температурный диапазон стандартных термоэлектрических преобразователей

Тип	Обозначение промышленного термопреобразователя	Типовой диапазон температур
T	ТМК [медь/медь – никель (медь/константан)]	–270...+400°С
J	ТЖК [железо/медь – никель (железо/константан)]	–210...+1200°С
K	ТХА [никель – хром/никель – алюминий (хромель/алюмель)]	–270...+1370°С
E	ТХКн [никель – хром/медь – никель (хромель/константан)]	–270...+1000°С
S	ТПП (платина – 10% родий/платина)	–50...+1768°С
B	ТПР (платина – 30% родий/платина – 6% родий)	0...+1820°С
R	ТПП (платина – 13% родий/платина)	–50...+1768°С
N	ТНН [никель – хром – кремний/никель – кремний (нихросил/нисил)]	–270...+1300°С

На рисунке 2.14 представлены характеристики стандартных термоэлектрических преобразователей.

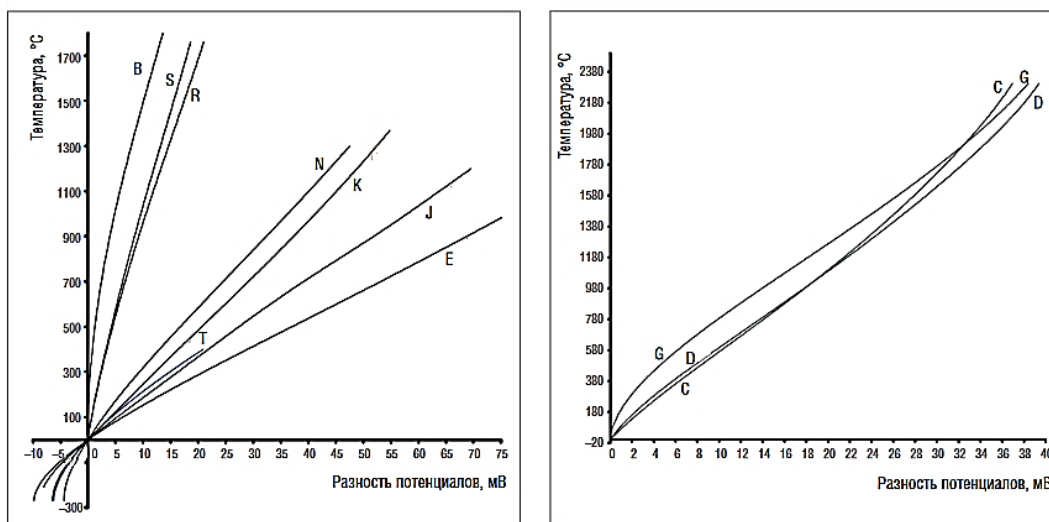


Рисунок 2.14 – Характеристики термоэлектрических преобразователей*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

К материалам термоэлектродов предъявляется ряд требований:

- однозначная и по возможности близкая к линейной зависимость термоЭДС от температуры;
- жаростойкость и механическая прочность с целью измерения высоких температур;
- химическая инертность;
- термоэлектрическая однородность материала проводника по длине, что

позволяет восстанавливать рабочий спай без переградуировки, а также менять глубину его погружения;

- технологичность изготовления с целью получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов;

- стабильность и воспроизводимость термоэлектрических свойств.

Для удобства стабилизации температуры свободных концов термопару иногда удлиняют с помощью удлинительных проводов, выполненных из соответствующих термоэлектродных материалов либо специально подобранных материалов, более дешевых, чем электродные, и удовлетворяющих условию термоэлектрической идентичности с основной термопарой в диапазоне возможных температур свободных концов (обычно от 0 до 100 °С). Иначе говоря, удлинительные провода должны иметь в указанном интервале температур такую же зависимость термоЭДС от температуры, что и у основной термопары.

Для предохранения от механических повреждений и вредного влияния объекта измерения термоэлектроды преобразователя помещают в защитную арматуру.

На рисунке 2.15, а показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

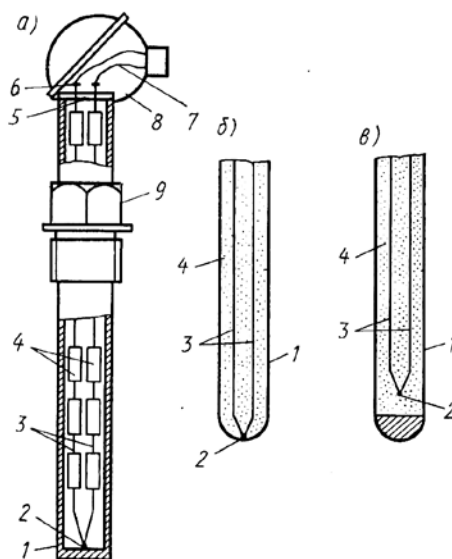


Рисунок 2.15 – Устройство термоэлектрического термометра*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью шульца 9. Для обеспечения

надежного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП).

Защитную гильзу выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно $15 \div 25$ мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до $2500 \div 3500$ мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет $2 \div 3$ мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью.

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (рис. 2.16). В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой или изолируется от нее. Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром $0,5 \div 6$ мм, длиной $10 \div 30$ м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от -50 до 300 °С при давлении в 40 МПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

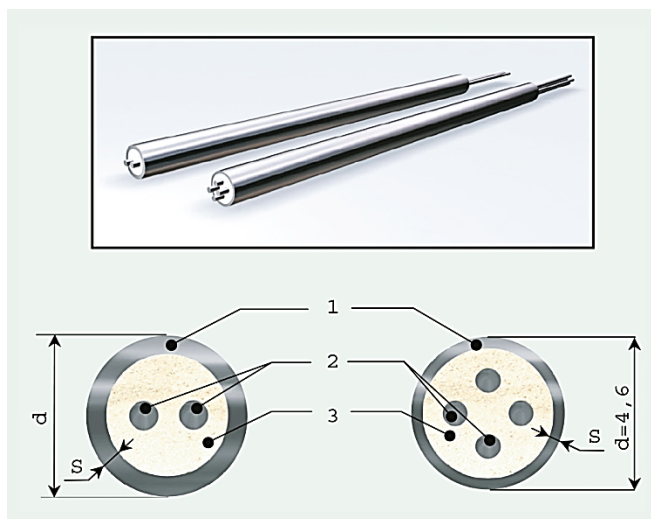


Рисунок 2.16 – Кабельные термоэлектрические преобразователи:

1 – оболочка кабеля; 2 – термоэлектроды; 3 – минеральная изоляция (MgO)*

*Использована иллюстрация из источника: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125272//>

На рисунке 2.17 приведены для сравнения характеристики термоЭДС термопарного кабеля КТМС-ХА (1) и термопары ХА в обычном исполнении (2) при 800 °С. Диаметр электродов 0,7 мм.

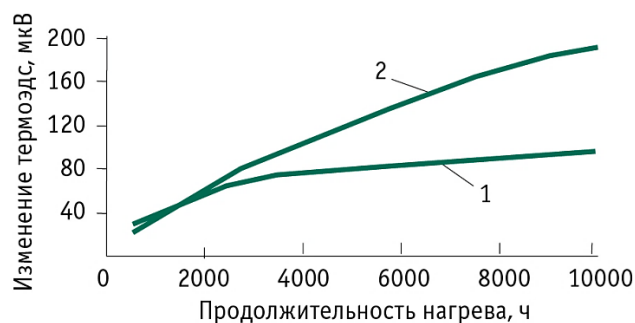


Рисунок 2.17 – Изменение термоЭДС термопарного кабеля КТМС-ХА (1) и термопары ХА в обычном исполнении (2) при 800°C*

*Использована иллюстрация из источника: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125272/>

Основной недостаток термопар – значительная инерционность (в обычной арматуре показатель тепловой инерции составляет несколько минут). В настоящее время известны конструкции малоинерционных термопар, у которых показатель тепловой инерции составляет не более 5 сек.

Термоэлектрические термометры состоят из термоэлектрического преобразователя (термопары) и электроизмерительного прибора (милливольтметра или компенсатора). Показания милливольтметра при постоянных значениях сопротивления проводников и внутреннего сопротивления прибора определяются значением ЭДС термопары и, следовательно, измеряемой температурой. Шкала прибора в этом случае градуируется с указанием типа термопары и выбранного значения внешнего сопротивления. Для подгонки внешнего сопротивления до значения, при котором производилась градуировка (0,6; 5; 15 или 25 Ом), используют уравнивательный резистор.

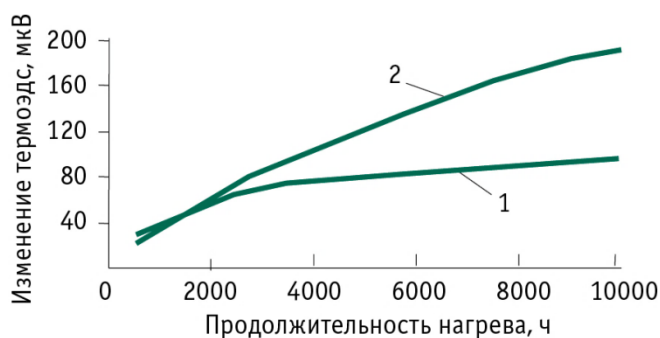


Рисунок 2.18 – Изменение термоЭДС термопарного кабеля КТМС-ХА (1) и термопары ХА в обычном исполнении (2) при 800 °С, диаметр электродов 0,7 мм*

*Использована иллюстрация из источника: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125272/>

Сопротивление проводов изменяется при колебаниях температуры воздуха. Для уменьшения влияния изменения сопротивления термопары и проводов применяют милливольтметры с большим внутренним

сопротивлением.

На рисунке 2.19 приведена схема термометра с автоматическим введением поправки на изменение температуры свободных концов термопары.

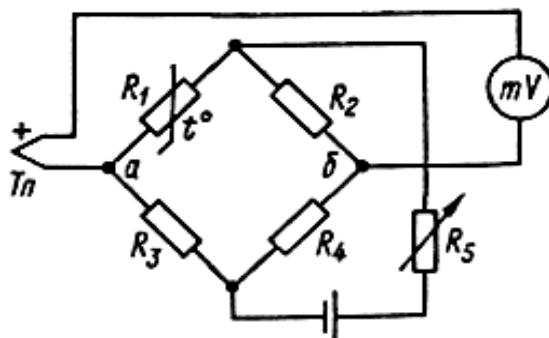


Рисунок 2.19 – Термоэлектрический термометр с автоматическим вводом поправки на изменение температуры свободных концов термопары*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Для этого последовательно в цепь термопары и милливольтметра включают неравновесный мост, в котором резистор R_1 выполнен из меди и находится в зоне, имеющей температуру свободных концов термопары; резисторы R_2 , R_3 и R_4 выполнены из манганина.

При градуировке термометра мост находится в равновесном состоянии. В процессе эксплуатации при отклонении температуры свободных концов термопары от значения, при котором производилась градуировка, в диагонали моста $a-b$ появляется разность потенциалов, суммирующаяся с термоЭДС термопары. Параметры моста подобраны так, что изменение термоЭДС от колебаний температуры свободных концов практически полностью компенсируется напряжением, снимаемым с моста. Чувствительность моста регулируют с помощью потенциометра R_5 .

2.6 Пирометры излучения

Все физические тела, температура которых превышает абсолютный нуль, испускают тепловые лучи. Средства измерения, определяющие температуру тел по их тепловому излучению, называют *пирометрами излучения (пирометрами)*. Как известно, тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, которая возбуждается внешними источниками энергии). Ввиду того, что интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, пирометры используются в основном для измерения температуры от $+300$ до $+6000$ °С и выше. Для измерения температур выше $+3000$ °С методы пирометрии являются практически единственными,

поскольку не требуют непосредственного контакта датчика прибора с объектом измерения. Теоретический верхний предел измерения температуры пирометрами излучения неограничен. Следует также отметить, что при использовании бесконтактных методов измерения не искажается температурное поле объекта измерения. В то же время для тех интервалов температур, где могут применяться и контактные методы, последним отдается предпочтение из-за их более высокой точности.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает волны всех длин в диапазоне от 0 до ∞ . Видимое глазом человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн $0,40 \div 0,75$ мкм. Невидимые лучи схватывают инфракрасный участок спектра, т. е. диапазон от $\lambda = 0,75$ до $\lambda \sim 400$ мкм, за которым следует постепенный переход в радиоволновой диапазон. Лучи с $\lambda < 0,40$ мкм также невидимы и относятся к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

В пирометрах излучения используются в основном лучи видимого и инфракрасного диапазонов. Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для так называемого «абсолютно черного тела». Реальные тела не являются абсолютно черными и лишь некоторые из них по оптическим свойствам близки к ним, например, нефтяная сажа, платиновая чернь, черный бархат в области видимого света имеют коэффициенты поглощения, мало отличающиеся от единицы.

На рисунке 2.20 представлена краткая классификация пирометров.

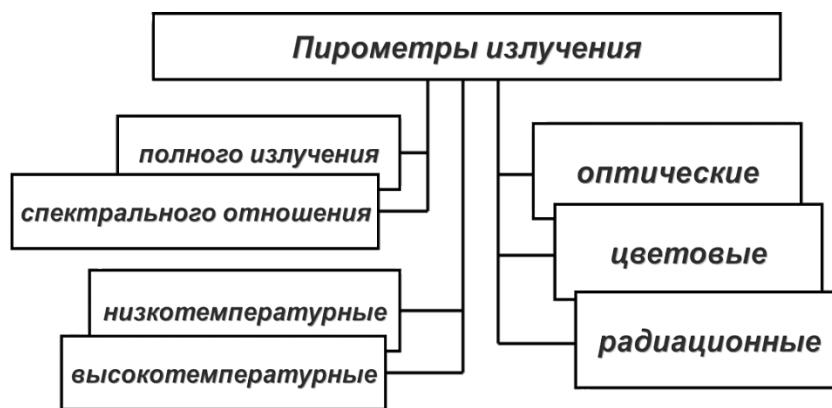


Рисунок 2.20 – Краткая классификация пирометров

Поскольку излучательная способность реальных тел меньше, чем черных тел, то показания пирометра будут соответствовать не действительной температуре реального тела, а дают условную, так называемую *яркостную температуру*. Пирометры, измеряющие яркостную температуру по спектральной яркости в видимой части спектра, называют *оптическими* и *фотоэлектрическими*.

Температурное излучение характеризуют переносимой им энергией. Количество лучистой энергии в лучах длиной волны от λ до $\lambda + \Delta\lambda$,

излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени, называют *монохроматической интенсивностью излучения*. Количество лучистой энергии, излучаемой при данной температуре единицей поверхности тела в единицу времени для длин волн от 0 до ∞ , называют *интегральной интенсивностью излучения*.

Для абсолютно черного тела зависимость монохроматической интенсивности излучения от температуры тела и длины волны выражают уравнением

$$J_{\lambda}^{\text{ч}} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1},$$

где C_1 и C_2 – постоянные излучения; λ – длина волны, для которой определяют интенсивность излучения; e – основание натуральных логарифмов; T – абсолютная температура. Эта зависимость положена в основу измерения температуры при помощи *оптических пирометров*.

Наблюдаемое в видимой части спектра излучения изменение цвета нагретых тел при повышении их температуры объясняется законом смещения Вина и связано с перераспределением энергии излучения. Исходя из этого, методы измерения температуры тел, основанные на изменении распределения энергии внутри данного участка спектра излучения, называют *цветовыми*, а приборы, измеряющие температуру по значению отношения энергетических яркостей в двух спектральных интервалах, называют *цветовыми пирометрами* или *пирометрами спектрального отношения*.

Логарифм отношения интенсивностей излучения при длинах волн λ_1 и λ_2 и при малых значениях λT

$$\ln \frac{J_{\lambda_1}^{\text{ч}}}{J_{\lambda_2}^{\text{ч}}} = \ln J_{\lambda_1}^{\text{ч}} - \ln J_{\lambda_2}^{\text{ч}} = C_1' - \frac{C_2'}{T},$$

где C_1' и C_2' — постоянные, зависящие от λ_1 и λ_2 . Полученная зависимость используется при измерении температуры *цветовыми пирометрами*.

Для реальных физических тел отношение спектральных яркостей отличается от подобного отношения для черного тела при той же температуре. Следовательно, цветовой пирометр, отградуированный по излучению черного тела, покажет при измерении температуры реального тела не действительную его температуру, а условную, называемую *цветовой температурой*.

Многие реальные тела, такие, как керамика, оксиды металлов, огнеупорные изделия, графит и др., являются практически серыми. В этой связи преимущества цветового метода измерения очевидны, так как цветовая температура многих твердых и жидких тел значительно меньше отличается от истинной температуры, чем яркостная или радиационная.

Для измерения температуры тел по их излучению можно использовать не только излучение определенной длины, но и суммарное излучение на всех длинах волн. Интегральная излучательность может быть получена интегрированием уравнения М. Планка. Получаемая в результате интегрирования зависимость выражает закон Стефана-Больцмана, который

устанавливает, что полная мощность излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$S^{\text{ч}} = \int_{\lambda=0}^{\infty} C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1} d\lambda = \sigma T^4,$$

где σ – постоянный коэффициент. На этой зависимости основано измерение температуры *радиационными пирометрами* или *пирометрами полного излучения*.

Если же чувствительный элемент радиационного пирометра воспринимает интегральную излучательность не во всем диапазоне длин волн от 0 до ∞ , а в некотором ограниченном интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , то такой пирометр называют *пирометром частичного излучения*.

Для измерения яркостной температуры тел используются *оптические (квазимонохроматические) визуальные пирометры*, а также *фотоэлектрические пирометры*.

Оптические пирометры широко применяются в лабораторных и производственных условиях для измерения температур свыше 800 °С. Принцип действия оптических пирометров основан на сравнении спектральной яркости тела со спектральной яркостью градуированного источника излучения. В качестве чувствительного элемента, определяющего совпадение спектральных яркостей в визуальных оптических пирометрах, служит глаз человека. Распространение получил оптический пирометр с исчезающей нитью, схема которого приведена на рисунке 2.21, а.

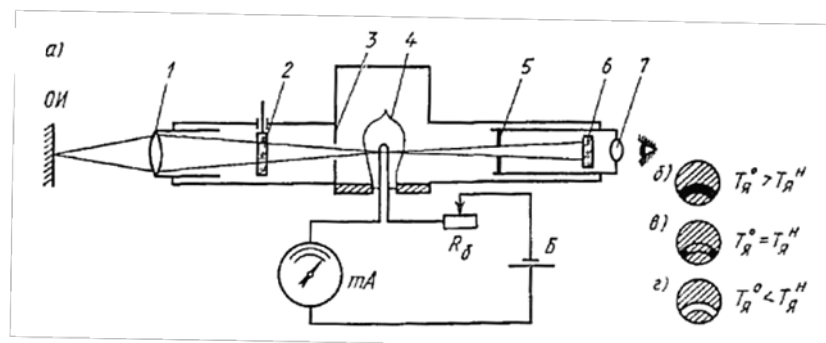


Рисунок 2.21 – Схема оптического пирометра*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Для измерения температуры объектив 1 прибора направляется на объект измерения ОИ так, чтобы наблюдатель на его фоне увидел в окуляре 7 нить оптической лампы 4. Сравнение спектральных яркостей объекта измерения и нити лампы 4 осуществляются обычно при длине волны равной 0,65 мкм, для чего перед окуляром установлен красный светофильтр 6. Выбор красного светофильтра обусловлен тем, что глаз человека воспринимает через этот фильтр только часть спектра его пропускания, приближающуюся к монохроматическому лучу. Красный светофильтр пропускает лучи длиной 0,62 мкм и выше. Человеческий глаз чувствителен к лучам длиной волны до 0,73 мкм. Таким образом, сравнение

интенсивностей излучения происходит практически в узком спектре $0,62 \div 0,73$ мкм.

Диафрагмы (входная 3 и выходная 5) ограничивают входной и выходной углы пирометра, оптимальные значения которых позволяют обеспечить независимость показаний прибора от изменения расстояния между объектом измерения и объективом. Наблюдая за изображением нити лампы на фоне объекта измерения [светлый фон – темная нить (рис. 2.21, б); темный фон – светлая нить (рис. 2.21, г)], с помощью реостата R_δ изменяют силу тока, идущего от батареи B к нити лампы, до тех пор, пока яркость нити не станет равной видимой яркости объекта измерения. При достижении указанного равенства нить «исчезает» на фоне изображения объекта измерения (рис. 2.21, в). В этот момент по шкале миллиамперметра mA , предварительно отградуированного в значениях яркостной температуры нити лампы, определяют яркостную температуру объекта. По измеренной яркостной температуре рассчитывают истинную температуру объекта. Нить оптической лампы выполнена из вольфрама, поэтому во избежание ее возгонки при температурах выше $1400^\circ C$, для измерения более высоких температур перед лампой включается ослабляющий или поглощающий светофильтр 2. Благодаря этому светофильтру уменьшается видимая яркость объекта измерения в кратное число раз, что позволяет не перекаливать нить и сохранить стабильность градуировки пирометра.

Существующие в настоящее время оптические пирометры предназначены для измерения температуры в интервале от 800 до $10000^\circ C$. Класс точности таких оптических пирометров обычно составляет $1,5 \div 4,0$.

В *радиационных пирометрах* (рисунок 2.22) интегральная интенсивность излучения воспринимается теплочувствительным элементом. Внутри телескопа, имеющего объектив 2 и окуляр 5, расположена помещенная в стеклянный баллон термобатарея из последовательно включенных термопар 4. Рабочие концы термопар находятся на лепестке, покрытом слоем платины. при наводке телескопа предусмотрен светофильтр 3.

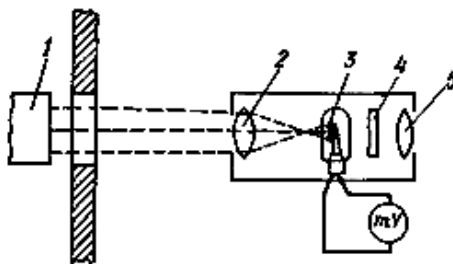


Рисунок 2.22 – Конструкция радиационного пирометра*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Телескоп наводят на объект 1 так, чтобы лепесток перекрывался изображением объекта и вся энергия излучения падала на рабочие концы термопар. ТермоЭДС термобатареи является функцией мощности излучения,

а, следовательно, и температуры тела. Для защиты глаз существуют различные конструкции термобатарей.

На рисунке 2.23 приведена звездообразная термобатарея, выполненная из десяти последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, в качестве которых обычно используются хромель-копелевые термоэлектроды диаметром $60\div 70$ мкм. Плоские рабочие концы преобразователей 3, зачерненные платиновой чернью, образуют венчик. Свободные концы термоэлектрических преобразователей закреплены с помощью металлических пластин 2 на слюдяном кольце 1. Температура свободных концов преобразователя при градуировке равна (20 ± 2) °С.

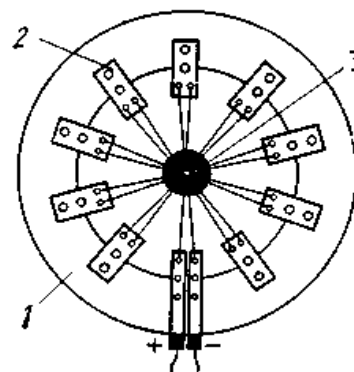


Рисунок 2.23

Для компенсации влияния изменения температуры свободных концов термобатареи параллельно последней подсоединяют катушку из медной или никелевой проволоки. Этот метод компенсации заключается в том, что, например, при увеличении температуры свободных концов термоЭДС термобатареи уменьшается, а сопротивление меди увеличивается и ток, ответвляющийся в измерительный прибор, изменяется незначительно.

Класс точности радиационных пирометров, как правило, составляет $1,0\div 2,0$. Постоянная времени этих приборов – $0,3\div 1,5$ с. При установке телескопа между ним и объектом не должно быть паров влаги, дыма, пыли и т. д., поскольку последние поглощают лучистую энергию, что может привести к дополнительной погрешности измерения.

Радиационные пирометры градуируют по излучению абсолютно черного тела, и для них также (как и для оптических) характерна погрешность от неполноты излучения физических тел. Точность радиационных пирометров ниже точности оптических.

На рисунке 2.24 представлен внешний вид радиационных (инфракрасных) пирометров серии Кельвин Компакт ЗАО «Евромикс» (Россия). Линейка переносных высокоточных пирометров разработана для эксплуатации во всех климатических зонах. Уникальное для компактного прибора оптическое разрешение (площадь обследуемого объекта) для измерения температуры объектов $2\div 5$ см на $5\div 10$ метрах.

Приборы имеют лазерный целеуказатель, установку излучательной способности, установку порога сигнализации, фиксацию последнего измерения, память на 1000 измерений, подключение к ПК, автоотключение. Диапазоны измеряемых температур: от $0\ldots +50$ °С (модель Кельвин Компакт М1) до $+800\text{°С}\ldots +3000$ °С (модель Кельвин Компакт 3000). Погрешность измерения: $1\% + 1$ °С. Время измерения: 1 сек. Разрешение: $0,1$ °С.



Рисунок 2.24 – Инфракрасный пирометр серии Кельвин Компакт производства ЗАО «Евромикс»*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Среди пирометров бюджетного класса выгодно выделяется *ADA TemPro 700* (рисунок 2.25) компании *Measurement Foundation*. Производитель заявляет про возможность измерения температур от -50 до $+700$ °C. Эффективность замеров обеспечивается оптическим разрешением на уровне 12:1. Время установления показаний – 0,5 сек. Питание – от батареи «Крона» 9 В. Точность повышает лазерный прицел.



Рисунок 2.25 – Инфракрасный пирометр *ADA TemPro 700**

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В *фотоэлектрических пирометрах* для измерения интенсивности излучения объекта применяют *фотопреобразователи* (фотоэлементы). Фотоэлектрические пирометры являются автоматическими устройствами. Чувствительными элементами, воспринимающими лучистую энергию, в этих приборах могут служить фотоэлементы, фотоумножители, фотосопротивления и фотодиоды. Измерение температуры

фотоэлектрическими пирометрами, как и оптическими визуальными, основано на зависимости спектральной яркости тела от его температуры.

Фотоэлектрические пирометры по принципу действия бывают двух типов. К первому типу относятся приборы, в которых воспринимаемая прибором лучистая энергия, попадая на чувствительный элемент, изменяет его параметры (фотоЭДС, сопротивление). В приборах второго типа измерение лучистой энергии осуществляется компенсационным методом, здесь чувствительный элемент работает в режиме нуль-индикатора, сравнивая интенсивности излучения от измеряемого тела и стабильного источника излучения — миниатюрной лампочки накаливания. Фотоэлектрические пирометры второго типа более сложны, но более точны, так как их показания не зависят от характеристик чувствительного элемента и электронной схемы.

Схема яркостного фотоэлектрического пирометра, работающего по компенсационному методу, приведена на рисунке 2.26, а.

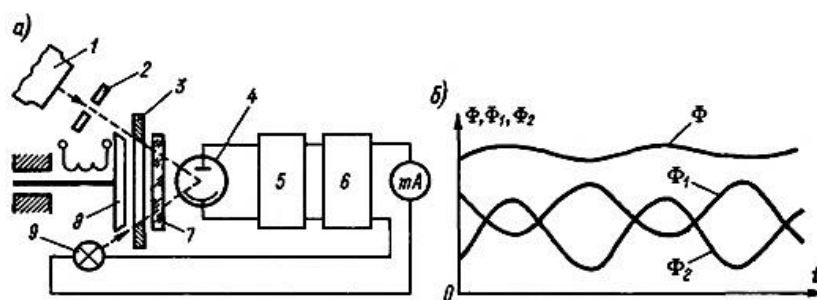


Рисунок 2.26 – Структурная схема и диаграмма световых потоков фотоэлектрического пирометра*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Фотоэлемент 4 освещается с одной стороны от объекта измерения 1 через диафрагму 2,3 и светофильтр 7, с другой стороны – от лампочки накаливания 9 через ту же диафрагму 3 и светофильтр 7. Диафрагму 3 перекрывает колеблющийся якорь 8 электромагнита таким образом, что на фотоэлемент попадают изменяющиеся во времени световые потоки Φ_1 и Φ_2 обоих источников излучения; при этом фазы переменных составляющих обоих потоков сдвинуты на 180° (рис. 2.26, б).

Результирующий световой поток Φ , имеющий переменную составляющую, амплитуда которой определяется разностью амплитуд переменных составляющих световых потоков Φ_1 и Φ_2 , преобразуется фотоэлементом в фототок. Переменная составляющая фототока усиливается усилителем переменного тока 5, выпрямляется фазочувствительным выпрямителем биввида постоянного тока направляется в миллиамперметр mA и лампу накаливания 9. Таким образом, в приборе осуществляется уравнивающее преобразование, благодаря чему показания прибора не зависят от нестабильности характеристик фотоэлемента, усилителя и

фазочувствительного выпрямителя.

В пирометре ФЭП-4 (рисунок 2.27) с диапазоном измерения яркостной температуры от 800 до 4000 °С используется сурьмяно-цезиевый фотоэлемент, который в сочетании со светофильтром делает прибор чувствительным к узкому спектру волн, близкому к спектру, воспринимаемому оптическим пирометром. Это позволяет градуировать фотоэлектрический пирометр по образцовому оптическому пирометру. Пирометр имеет несколько диапазонов измерений. Переход с одного диапазона на другой осуществляют заменой диафрагмы. Прибор оснащен быстродействующим автоматическим потенциометром-регистратором с самопишущим устройством.



Рисунок 2.27 – Фотоэлектрический пирометр ФЭП-4 (СССР)*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Цветовые пирометры являются предпочтительным вариантом для мест, где есть стабильное задымление, где собирается много пыли или смотровые стёкла постоянно засоряются. Необходимо понимать при этом, что важный источник погрешностей – нестабильность при работе фотоэлемента – все равно остается, и устранить эту проблему окончательно нельзя. Считается, что при надлежащем режиме работы фотоэлемента фотоэлектрические цветовые пирометры могут обеспечить измерение температуры порядка 2500 °С с погрешностью не более $\pm 1\%$.

Список рекомендуемой литературы

1. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Физические основы получения информации: учебное пособие для студентов вузов / В. Ю. Шишмарев. - М.: Академия, 2010. – 447 с.