

Электрические измерения неэлектрических величин

ГПОУ «СЦБТ»

РАСОВ Д.Д.

Измерение температуры

В окружающем нас мире существует великое множество незлектрических величин. И для оценки их значений в настоящее время широко используются электрические методы и средства измерений. Для того, чтобы использовать все достоинства электрических форм преобразования информации, необходимо предварительно преобразовать незлектрическую физическую величину в электрическую (электрическое напряжение, ток, электрическое сопротивление или емкость, частоту следования импульсов, индуктивность, заряд или др.).

Рассмотрим применение этих подходов на примере измерения некоторых незлектрических величин, наиболее часто встречающихся в практических задачах.

Температура — одна из важнейших физических величин, оцениваемых в задачах различных научных, технических, промышленных исследований. Температура — это своеобразная физическая величина, которая присуща всем предметам и веществам, находящимся в любом состоянии (и твердым телам, и жидкостям, и газам, и веществам в комбинированном состоянии).

В настоящее время используются как *электрические*, так и *неэлектрические* методы и средства измерения температуры. Неэлектрические методы представлены, например, обычными жидкостными термометрами. Электрические методы (основа современных измерений) реализованы, например, в термометрах и регистраторах на основе термоэлектрических преобразователей. В этой главе речь пойдет только об электрических методах и средствах.

Различают *статические* (в которых предполагается неизменность значения температуры в течение времени наблюдения) и *динамические* измерения (когда процесс достаточно быстро меняется и принципиально важно знать характер поведения величины и (или) важно оперативно отслеживать все изменения, как, например, в системе автоматизированного управления). Существует также деление средств измерения температуры на показывающие и регистрирующие. Первые реализуют статические модели и имеют только шкалу или цифровой индикатор для отсчета текущего значения. Вторые предназначены для динамических моделей и позволяют записывать изменения температуры (как функции времени) в течение некоторого, порой достаточно длительного, интервала времени.

По способам преобразования информации методы и средства измерения (регистрации) делят на *аналоговые* и *цифровые*. Цифровые термометры имеют ряд известных преимуществ перед аналоговыми — более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, быстроедействие, надежность. Кроме того, цифровая форма представления информации обеспечивает простоту дальнейшей автоматизированной обработки, хранения, передачи и представления данных.

По принципу взаимодействия прибора с объектом методы и средства измерения температуры делятся на *контактные* и *бесконтактные*. Первые проще в применении и могут обеспечивать более высокую точность. Вторые удобнее в работе (а в некоторых задачах просто незаменимы), позволяют получить результат быстрее, хотя, может быть, и с большей погрешностью.

Многоканальные измерители (регистраторы) температуры предназначены для регистрации нескольких процессов и/или синхронных измерений температуры в нескольких точках.

В настоящее время в практике температурных измерений используются, как правило, цифровые средства измерения температуры, основанные на электрических методах преобразования. При этом применяются как статические, так и динамические модели объектов и процессов. Одинаково широко распространены и контактные, и бесконтактные методы и средства.

Одноканальные измерители применяются чаще многоканальных, хотя широко используются *комбинированные* цифровые приборы, которые могут измерять две или несколько различных физических величин, например, температуру и относительную влажность воздуха или температуру и скорость потока воздуха (термоанемометр). Среди регистраторов температуры многоканальность встречается чаще, чем в показывающих приборах.

Основными требованиями, предъявляемыми к средствам измерения и регистрации температуры (как, впрочем, и к другим средствам технических измерений), являются: необходимая достоверность результатов измерения, надежность и возможность работы в жестких условиях эксплуатации, малые габаритные размеры и масса, простота и удобство работы, отсутствие влияния (точнее — пренебрежимо малое влияние) на ход исследуемых процессов, наглядность представляемой информации, доступная цена.

Контактные методы и средства измерений

Если преобразовать неэлектрическую физическую величину — температуру θ — в какую-либо пропорциональную электрическую величину (ЭДС E , напряжение U , ток I , сопротивление R , частоту сигнала f и т. п.) с помощью первичных измерительных преобразователей, то затем ее значение можно легко определить средствами электрических измерений.

При построении первичных измерительных преобразователей (датчиков) используются разнообразные физические эффекты. В основном применяются следующие разновидности термоэлектрических датчиков:

- металлические термометры сопротивления (ТС);
- термоэлектрические преобразователи (ТП) — термопары;
- полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы);
- полупроводниковые интегральные сенсоры (датчики);
- пьезоэлектрические (кварцевые) преобразователи с частотным выходным сигналом.

Основные англоязычные термины этого класса преобразователей таковы: Resistance Temperature Detector (RTD) — термометр сопротивления; Thermo-Couple (TC) — термопара; Thermistor — термистор; Monolithic Linear Temperature Sensor — монолитный полупроводниковый датчик (с линейной характеристикой преобразования); Quartz Sensor — кварцевый датчик.

Рис. 8.1 качественно иллюстрирует различия в характеристиках преобразования наиболее распространенных типов датчиков.

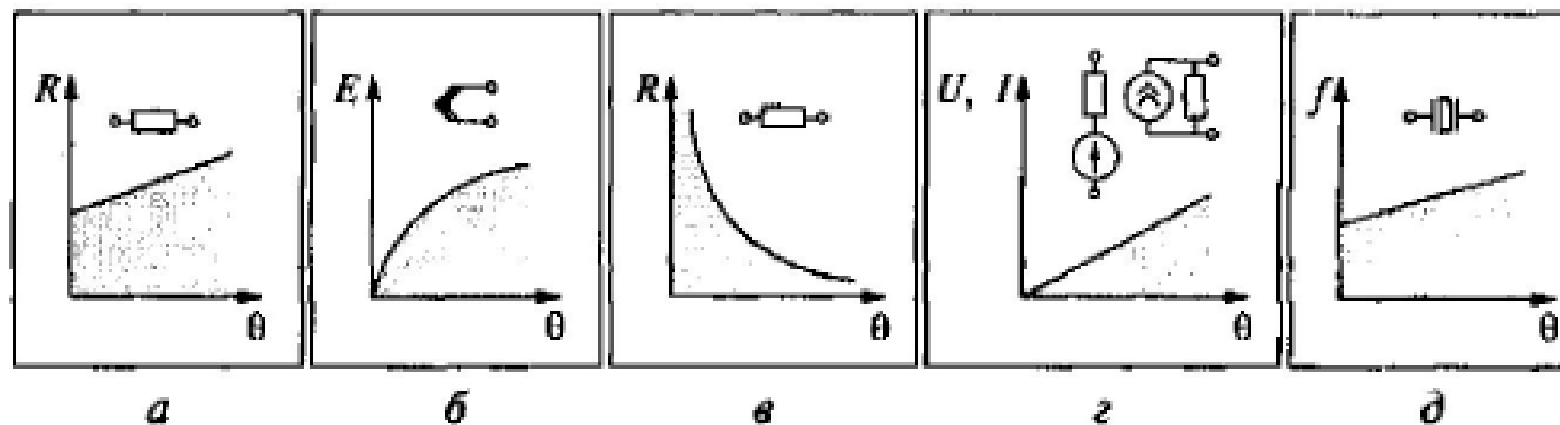


Рис. 8.1. Различия характеристик датчиков температуры:

a — термометр сопротивления; *б* — термопара; *в* — термистор; *г* — интегральные полупроводниковые датчики; *д* — кварцевый резонатор

Можно кратко охарактеризовать основные особенности этих первичных измерительных преобразователей следующим образом.

Металлические ТС обеспечивают высокую точность, хорошие линейность, стабильность и повторяемость характеристик. Основные недостатки — возможное значительное влияние (на результат измерения) сопротивления проводников линии связи, необходимость дополнительного источника питания (напряжения или тока). Кроме того, возможен саморазогрев ТС от протекающего по нему тока, что может привести к дополнительным погрешностям.

Термопары не требуют вспомогательного источника питания, имеют широкий диапазон измеряемых температур. Однако им присуща заметная нелинейность характеристики преобразования. Некоторые проблемы создает необходимость учета (или компенсации) влияния температуры свободных концов ТП на результат измерения. Кроме того, малое выходное напряжение (и сравнительно невысокая чувствительность) требует довольно чувствительных вторичных преобразователей (усилителей) и/или выходных приборов.

Термометры сопротивления и термопары отличаются достаточно высокими точностью, стабильностью и повторяемостью своих характеристик преобразования.

Термисторы (полупроводниковые сопротивления), в свою очередь, имеют высокую чувствительность, простую двухпроводную схему включения (не требующую компенсации температуры свободных концов, как у ТП), сравнительно высокое быстродействие. Но при этом у них есть серьезные недостатки: резко нелинейная характеристика преобразования и плохая повторяемость характеристики. Кроме того, они имеют сравнительно узкий диапазон измеряемых температур.

Полупроводниковые интегральные датчики характеризуются высокой линейностью характеристики преобразования, однако имеют ограниченный диапазон измеряемых температур (до 150...200 °С) и, кроме того, требуют наличия внешнего источника питания.

У датчиков на основе *кварцевых резонаторов* выходной величиной является изменение резонансной частоты колебаний при изменении температуры. Такие датчики обеспечивают наиболее высокую точность, правда, в узком диапазоне температур. Кроме того, часто основные параметры характеристики преобразования таких датчиков и их температурные коэффициенты не стандартизованы и подразумевают индивидуальную градуировку.

Все упомянутые датчики выпускаются в различном конструктивном исполнении, что позволяет решать самые разнообразные задачи (работать с жидкостями, газами, сыпучими средами, с поверхностями различных профилей, в различных температурных диапазонах и др.). Есть датчики для поверхностных измерений, погружные, воздушные, магнитные датчики (которые легко крепятся на ферромагнитных, например, стальных поверхностях), датчики, закрепленные на «липучей» ленте, датчики на подшипниках и др.

Контактные электрические методы, реализованные в различных средствах измерения/регистрации на основе таких преобразователей, позволяют работать в достаточно широком диапазоне температур ($-200 \dots +2000$ °С). Погрешность таких контактных измерителей температуры зависит не только от качества первичных измерительных преобразователей (датчиков), но и от организации линии связи датчик — измеритель, а также от характеристик вторичных преобразователей. Типичные значения погрешностей таких термометров $\pm(0,2 \dots 1)$ %, хотя в некоторых моделях достигаются значения погрешностей $\pm(0,01 \dots 0,1)$ %. Типичная чувствительность результатов измерения — доли градуса Цельсия.

Рассмотрим подробнее особенности применения наиболее распространенных типов датчиков.

Термометры сопротивления. Приборы и преобразователи на основе металлических ТС используют зависимость электрического сопротивления металлов R_T от температуры θ . У чистых металлов эта зависимость практически линейна и количественно выражается следующим образом:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\theta),$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления α , $1/^\circ\text{C}$, определяется по формуле

$$\alpha = (\Delta R/R)/\Delta\theta,$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления датчика при изменении температуры $\Delta\theta$.

Этот коэффициент можно задать иначе, $\%/^\circ\text{C}$:

$$\alpha = (\Delta R \cdot 100/R)/\Delta\theta.$$

Значения температурного коэффициента сопротивления α у современных ТС лежат в диапазоне $0,003 \dots 0,006 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, что соответствует приращению сопротивления примерно на $0,3 \dots 0,6 \%$ от исходного (номинального) значения (при 0°C) при увеличении температуры на 1°C .

Наиболее часто используемые материалы: медь (для диапазона температур $-50 \dots +200^\circ\text{C}$) и платина (для диапазона $-250 \dots +1000^\circ\text{C}$) — рис. 8.2. Номинальные значения сопротивления ТС определяются конструкцией и материалом датчика, конкретной градуировкой и лежат в диапазоне $10 \dots 1000 \text{ Ом}$ (при 0°C или при комнатной температуре).

Медные ТС выпускаются с различными номинальными значениями сопротивления: $25 \dots 1000 \text{ Ом}$. Например, на рис. 8.2, а показана характеристика медного (Cu 53) ТС с номинальным (при 0°C) сопротивлением $R_0 = 53 \text{ Ом}$.

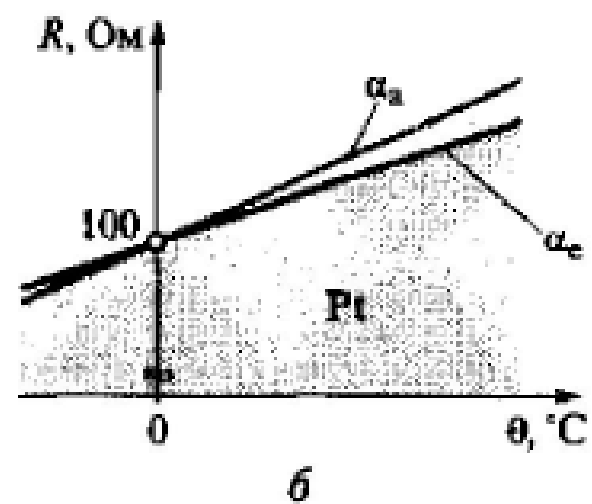
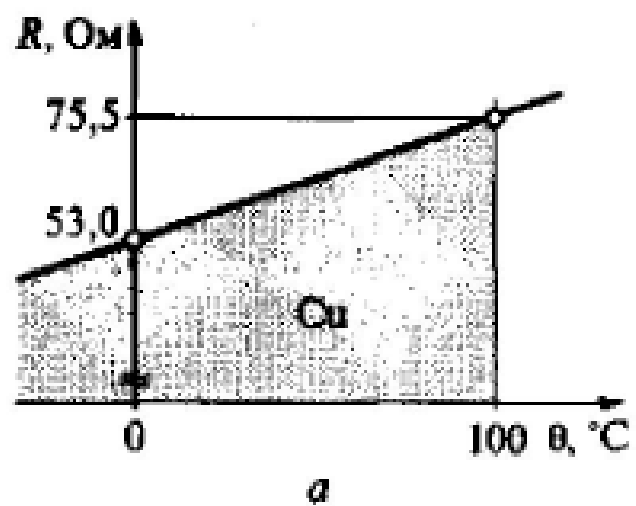


Рис. 8.2. Характеристики медных (а) и платиновых (б) ТС

Платиновые ТС довольно широко распространены в различных технических измерениях. Они изготавливаются из чистой платины (99,99 %). Чаще всего используются ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом (Pt 100) при 0 °С, хотя существуют ТС и с другими значениями номинального сопротивления: 25, 500, 1000 Ом. Номинальные значения токов, протекающих по ТС, обычно таковы: 1 мА (для Pt 100) и 0,1 мА (для Pt 1000). Температурный коэффициент сопротивления α платиновых (Pt 100) ТС имеет два значения: по европейской версии $\alpha_e = 0,00385 \text{ Ом/Ом/}^\circ\text{С}$ и по американской версии $\alpha_a = 0,00392 \text{ Ом/Ом/}^\circ\text{С}$ (рис. 8.2, б).

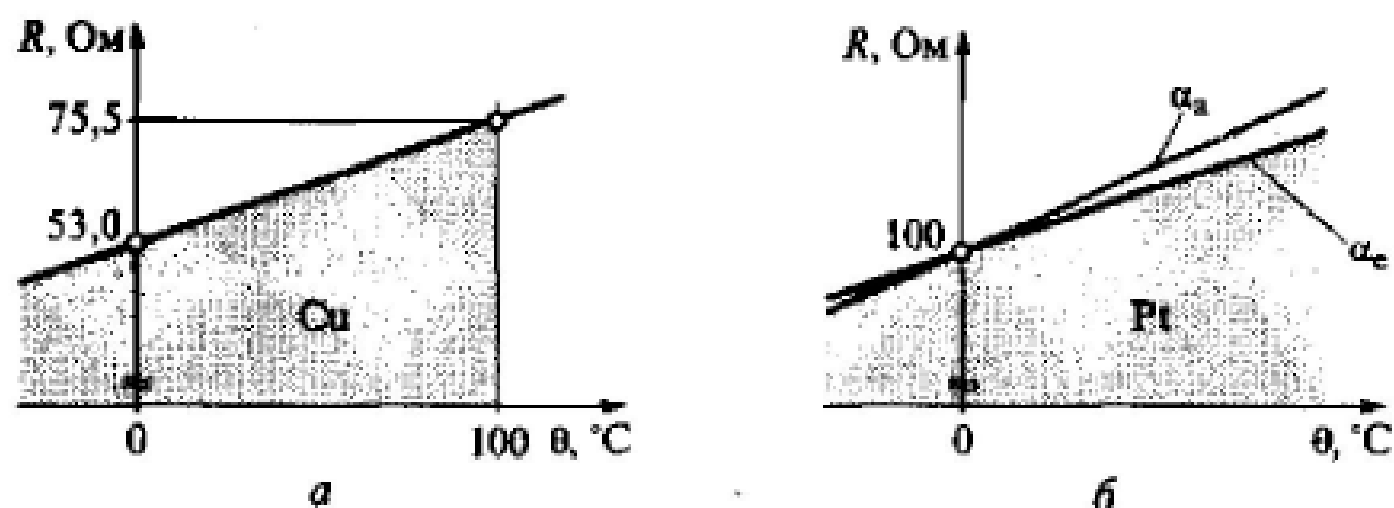


Рис. 8.2. Характеристики медных (а) и платиновых (б) ТС

Конструктивно ТС состоят из собственно чувствительного элемента, защитного кожуха (чехла) и элементов крепления. Чувствительный элемент представляет собой намотку из тонкой изолированной проволоки (диаметром доли миллиметра) на диэлектрическом каркасе (стержне), выполненном из слюды, керамики или стекла. Существуют также ТС фольгового (тонкопленочного — Thin Film Detector — TFD) исполнения, обеспечивающего минимальную тепловую инерционность датчика. Фольговые (пленочные) ТС имеют в 5...10 раз меньшее значение времени реакции (отклика), чем у проволочных ТС, что чрезвычайно важно при работе с миниатюрными объектами в динамических измерениях при быстроменяющихся температурах.

Как правило, ТС включаются в мостовые схемы. Различают *уравновешенные* и *неуравновешенные* мостовые схемы. Уравновешенный мост имеет один или несколько резисторов, сопротивление которых может целенаправленно изменяться (вручную или автоматически) с тем, чтобы добиться равновесия. Равновесие моста характеризуется отсутствием разности потенциалов (и, следовательно, тока) в измерительной диагонали моста (в цепи чувствительного нулевого индикатора И), что означает равенство произведений сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_x резисторов $R1, R2, R3, R_x$ противоположных плеч моста (рис. 8.3, а):

$$R_x R_2 = R_1 R_3.$$

Зная значения сопротивлений R_1, R_2, R_3 , можно определить значение неизвестного сопротивления:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2.$$

Если в роли R_x выступает ТС с сопротивлением R_T (рис. 8.3, б), то можно, зная характеристику ТС, оценить значение температуры θ , которая действует на датчик. В случае неуравновешенного моста значение R_T сопротивления ТС (и, следовательно, температуры θ) определяется по значению разности потенциалов измерительной диагонали моста. Уравновешенные мосты обладают более высокой точностью в сравнении с неуравновешенными.

Главная проблема при работе с датчиками — ТС — влияние на результат измерения сопротивления проводников линии связи $r_{д.с.}$. Не всегда мостовая схема может быть расположена в непосредственной близости от объекта, на котором установлен датчик, поэтому в общем случае может потребоваться многометровая линия связи. В зависимости от специфики конкретных задач измерений применяются двухпроводное, трехпроводное или четырехпроводное подключение ТС к измерителю.

Преимущество *двухпроводной* схемы в том, что для подключения ТС требуются всего два проводника линии связи (что особенно важно в случаях, когда линия связи большой длины). Однако при двухпроводной линии связи (см. рис. 8.3, б) сопротивление $r_{л.с}$ соединительных проводников (и его изменения при естественных колебаниях температуры окружающей среды) прямо входит в результат измерения. Поскольку длина линии связи может быть значительной (десятки метров), то и погрешность может оказаться большой.

Существуют различные способы компенсации этой погрешности. Один из них — использование *трехпроводной* схемы подключения ТС (рис. 8.4, а).

В этом случае при равновесии мостовой схемы выполняется соотношение

$$(R_T + r_{л.с})R_2 = R_1(R_3 + r_{л.с}).$$

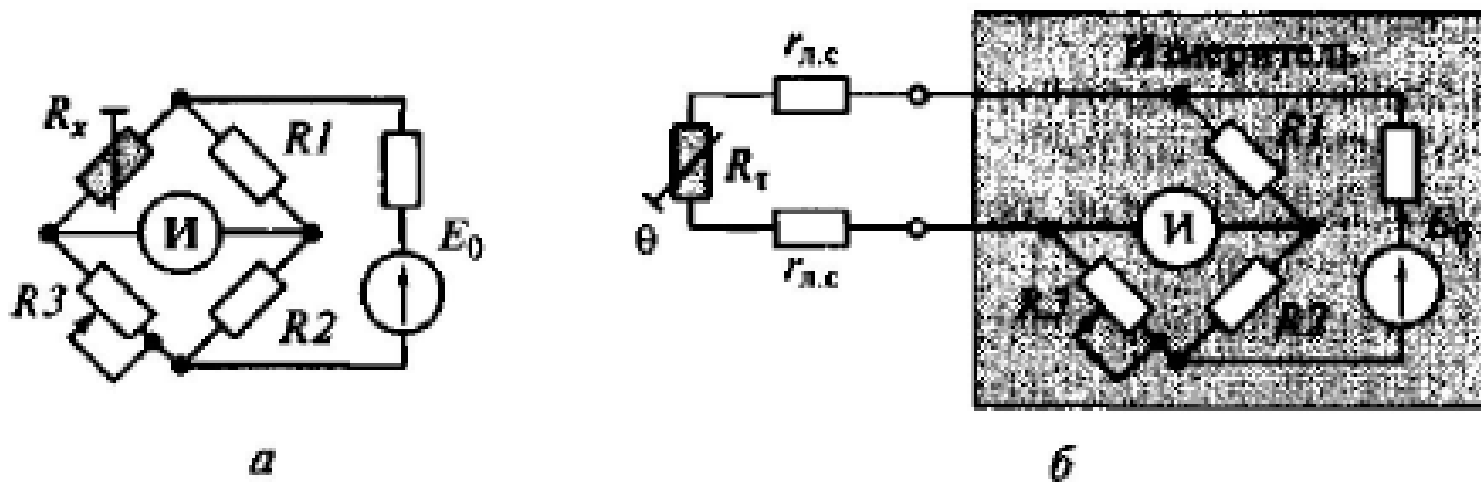


Рис. 8.3. Включение ТС в мостовую схему:

a — принцип действия моста; *б* — двухпроводная схема подключения

Если в схеме моста $R_1 = R_2$ и сопротивления $r_{д.с}$ соединительных проводников одинаковы (это естественное предположение), то результат измерения будет определяться только температурой ТС и не будет зависеть от значения сопротивлений $r_{д.с}$. Отметим, что сопротивление проводника $r_{д.с}$ в цепи индикатора И не имеет значения, так как в случае равновесия моста в этой цепи тока нет.

Применяются также и *четырёхпроводное* включение (рис. 8.4, б). Правда, это уже не мостовая схема. В основе такого измерителя источник известного постоянного тока I_0 , который протекает через сопротивление ТС R_T . При этом сопротивления соединительных проводников $r_{д.с}$ и их изменения практически не влияют на значение тока I_0 и, следовательно, на результат измерения. Вольтметром V (с большим входным сопротивлением) измеряется падение напряжения собственно на сопротивлении ТС R_T .

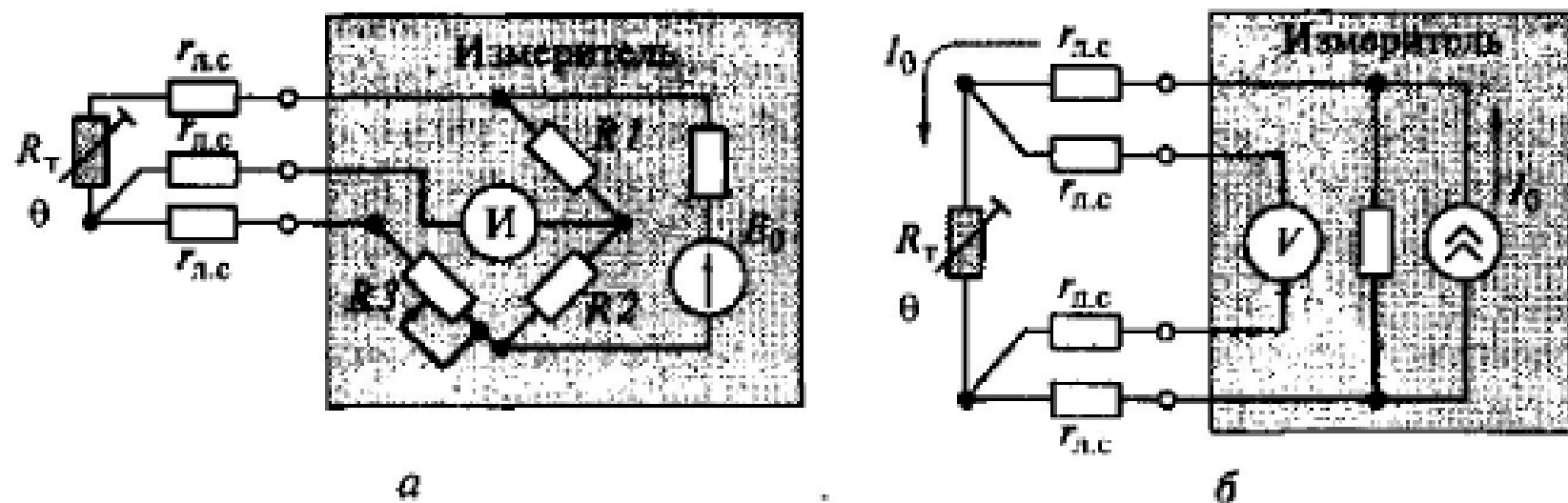


Рис. 8.4. Трехпроводное (а) и четырехпроводное (б) включение ТС

Одним из проявлений методической погрешности является возможное искажение результата вследствие нагрева ТС протекающим по нему током. Уменьшение напряжения питания моста E_0 позволяет уменьшать этот ток, но в то же время приводит к снижению чувствительности. Поэтому иногда для достижения высокой чувствительности и одновременно сохранения допустимого среднего значения тока в резисторах применяют для питания моста не постоянное напряжение, а импульсное достаточно большой амплитуды.

Термопары. Приборы и преобразователи на основе термопар широко распространены. Компактные цифровые термометры на основе термопар являются в настоящее время основным и самым массовым инструментом в температурных измерениях.

Выходной сигнал термопары — постоянное напряжение — довольно легко может быть преобразован в цифровой код или измерен простыми средствами (например, малогабаритным цифровым мультиметром). Термопары могут быть подключены для дальнейшего преобразования к различным вторичным измерительным преобразователям (приборам) как аналоговым, так и цифровым, для статических и динамических измерений.

Диапазон температур, измеряемых с помощью ТП, довольно широк: от -200 до $+2000$ °С. Измерители на основе ТП отличаются высокой точностью и чувствительностью, хорошей повторяемостью характеристики преобразования. Обычный диапазон выходных напряжений составляет $0 \dots 50$ мВ (в зависимости от используемых в ТП материалов), типичный температурный коэффициент преобразования (чувствительность ТП) лежит в диапазоне $10 \dots 50$ мкВ/°С.

В основе ТП лежит термоэлектрический эффект, суть которого заключается в следующем. Если два проводника из различных металлов (сплавов) соединены в замкнутую цепь, причем температура одного соединения (спая) заметно отличается от температуры другого, то возникает термоЭДС E_T (и в замкнутой цепи будет протекать ток), значение которой зависит от разности температур спаев и характеристик материалов проводников. Если в разрыв свободных концов включен измеритель ЭДС или вольтметр V , то его показания будут определяться разницей температур $(\theta_1 - \theta_2)$ (рис. 8.5, а).

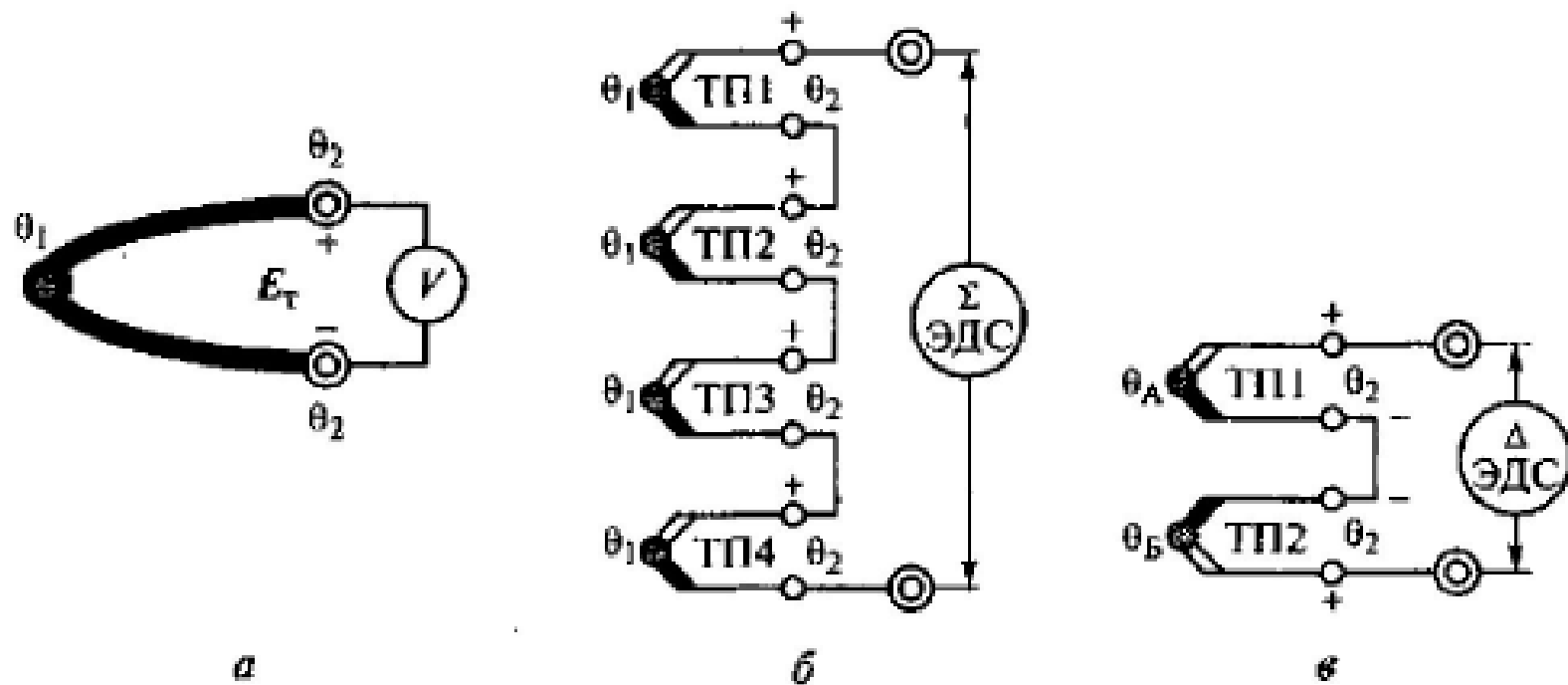


Рис. 8.5. Термоэлектрические преобразователи (термопары):

a — возникновение термоЭДС; *b* — термобатарея; *v* — дифференциальная термопара; θ_1 — температура рабочего спая; θ_2 — температура свободных концов; *V* — измеритель ЭДС или напряжений

Зависимость термоЭДС от разности температур спаев нелинейна, но для небольших диапазонов температур, при невысоких точностных требованиях (или упрощая взгляд на характеристику ТП) ее можно считать линейной. И тогда значение термоЭДС термопары E_T определяется (в первом приближении) следующим образом:

$$E_T = S_T(\theta_1 - \theta_2),$$

где S_T — чувствительность ТП (коэффициент преобразования); θ_1 — температура рабочего (так называемого «горячего») спая; θ_2 — температура свободных (так называемых «холодных») концов.

Для обеспечения однозначной зависимости термоЭДС от температуры θ_1 необходимо поддерживать постоянной и известной температуру θ_2 . Обычно это 0 или $+20^\circ\text{C}$. Таким образом, зная значение S_T и измерив значение термоЭДС термопары, можно определить температуру θ_1 . Конечно, для работы в широких температурных диапазонах необходимо пользоваться более точными выражениями — полиномиальными аппроксимациями нелинейной зависимости E_T от разности температур. В современных цифровых термометрах применяется автоматическая линейаризация характеристик преобразования ТП.

В настоящее время, как правило, вместо методов и средств поддержания постоянства значения θ_2 применяются способы и устройства автоматической компенсации влияния температуры окружающей среды на свободные концы ТП.

Для повышения чувствительности таких термометров иногда объединяют последовательно несколько термопар в *термобатарей* (рис. 8.5, б). При этом рабочие концы всех термопар находятся при температуре исследуемого объекта θ_1 , а свободные — при постоянной (или известной) температуре θ_2 . Суммарная выходная термоЭДС, естественно, будет равна сумме термоЭДС отдельных ТП.

Для нахождения разности температур двух объектов применяются так называемые *дифференциальные термопары*, которые состоят из двух встречно включенных ТП (рис. 8.5, в). Рабочие концы ТП имеют разную температуру (θ_A и θ_B), а свободные — одинаковую θ_2 . В результате выходное напряжение пропорционально разности температур.

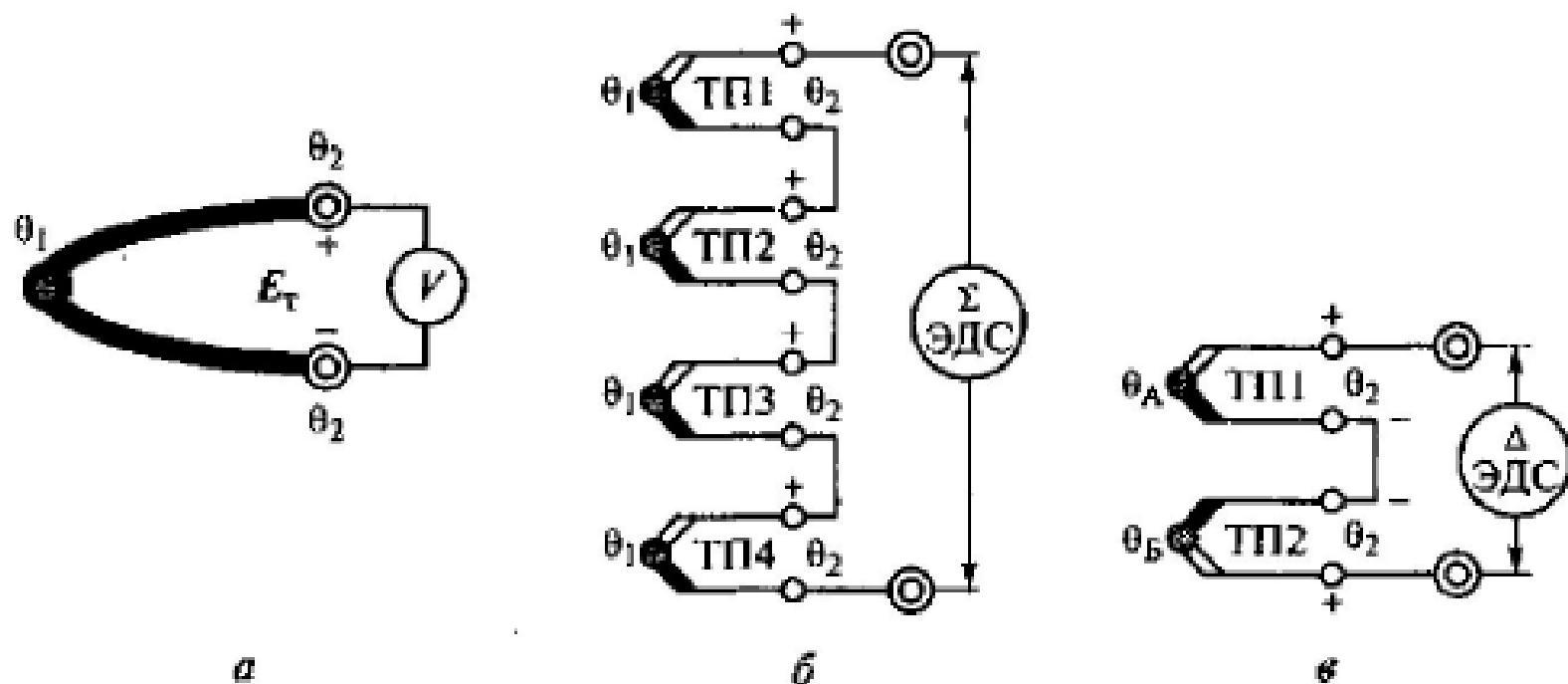


Рис. 8.5. Термоэлектрические преобразователи (термопары):

a — возникновение термоЭДС; *b* — термобатарея; *v* — дифференциальная термопара; θ_1 — температура рабочего спая; θ_2 — температура свободных концов; *V* — измеритель ЭДС или напряжений

В соответствии с общепринятой международной классификацией термоэлектрические преобразователи (термопары) разделяются на несколько типов в зависимости от применяемых материалов и характеристик. Характеристики некоторых основных типов ТП приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Основные характеристики некоторых типов ТП

Тип ТП	Материал ТП	Диапазон измерения (кратковременно), °С	Коэффициент преобразования, мкВ/°С при 20 °С
<i>E</i>	Хромель — константан	-270...+1000	62
<i>J</i>	Железо — константан	-210...+1000 (1200)	51
<i>K</i> (ТХА)	Хромель — алюмель	-200...+1000 (1372)	40
<i>R</i> (ТПП)	Платина — платинородий (13 % родия)	-50...+1500 (1700)	7
<i>S</i> (ТПП)	Платина — платинородий (10 % родия)	-50...+1600 (1768)	7
<i>T</i> (ТМК)	Медь — константан	-270...+400	40

Термисторы. Существует особый класс датчиков — полупроводниковые термометры сопротивления, имеющие значительно больший, чем обычные ТС, температурный коэффициент сопротивления, равный $1 \dots 20 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, причем знак этого коэффициента может быть как положительным (у позисторов), так и отрицательным (у термисторов). Это обеспечивает значительно более высокую чувствительность термометров на их основе. Основные преимущества: малые габариты и масса (и, следовательно, малая тепловая емкость и тепловая инерционность), простота конструкции и, следовательно, хорошие надежность и механическая прочность, а также — низкая цена. Основные недостатки этих преобразователей: сравнительно узкий диапазон измеряемых температур (типично $-50 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$), значительная нелинейность преобразования (сопротивление термисторов с ростом температуры уменьшается примерно по экспоненциальному закону), плохая повторяемость характеристики преобразования от экземпляра к экземпляру (что означает необходимость индивидуальной градуировки и затрудняет замену датчиков даже одного типа), значительная временная нестабильность характеристики, особенно при длительной работе на высоких температурах.

Интегральные полупроводниковые датчики. Интегральные датчики появились сравнительно недавно благодаря успехам микроэлектроники. Эти датчики обеспечивают выходной сигнал (напряжение или ток), практически линейно зависящий от температуры θ . Схемы подключения этих датчиков к собственно измерителю показаны на рис. 8.7.

На рис. 8.7, *а* приведена схема подключения интегрального датчика напряжения. Выходное напряжение $U = f(\theta)$ датчика через усилитель-повторитель подается на вход цифрового вольтметра ЦВ или аналого-цифрового преобразователя АЦП, преобразующего это напряжение, пропорциональное температуре, в цифровой код. Чувствительность таких датчиков обычно $10 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$.

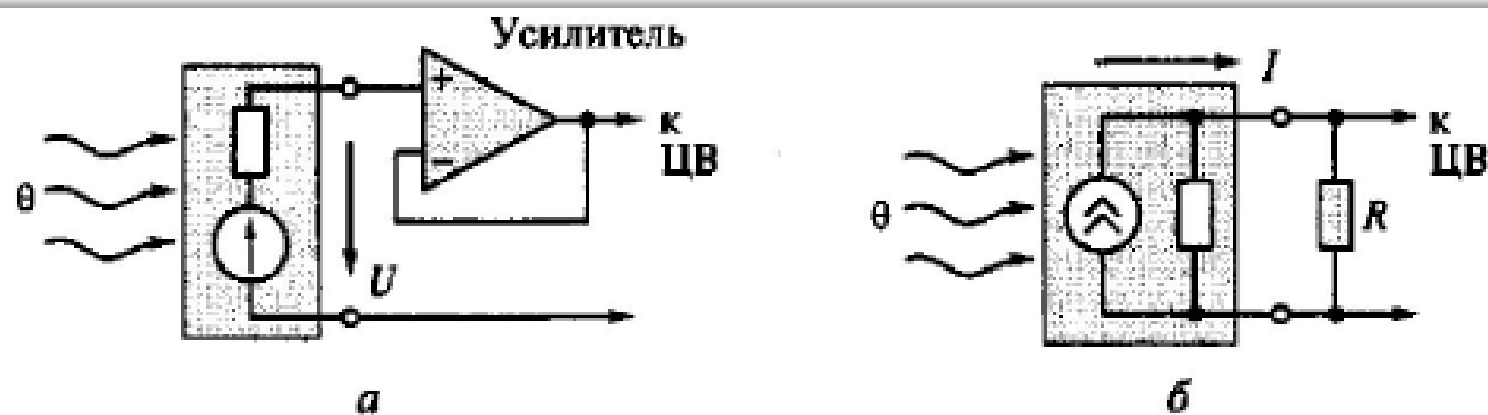


Рис. 8.7. Подключение интегральных полупроводниковых датчиков:

а — напряжения; *б* — тока

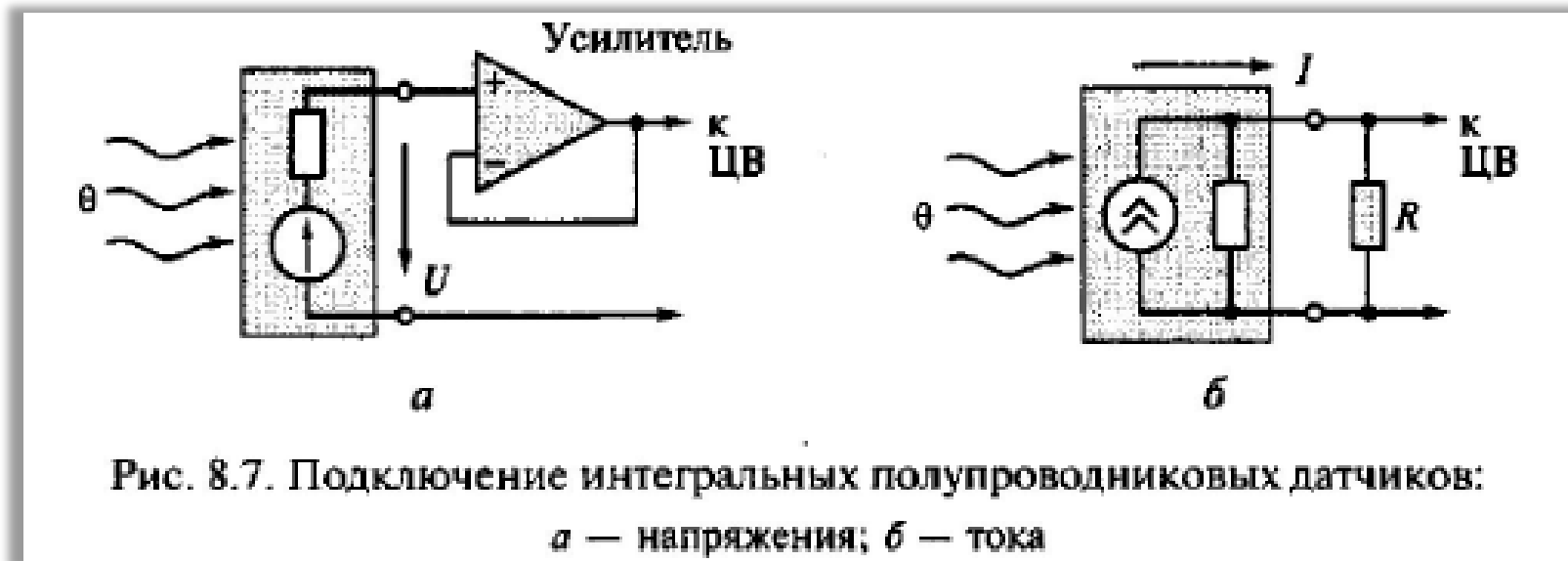
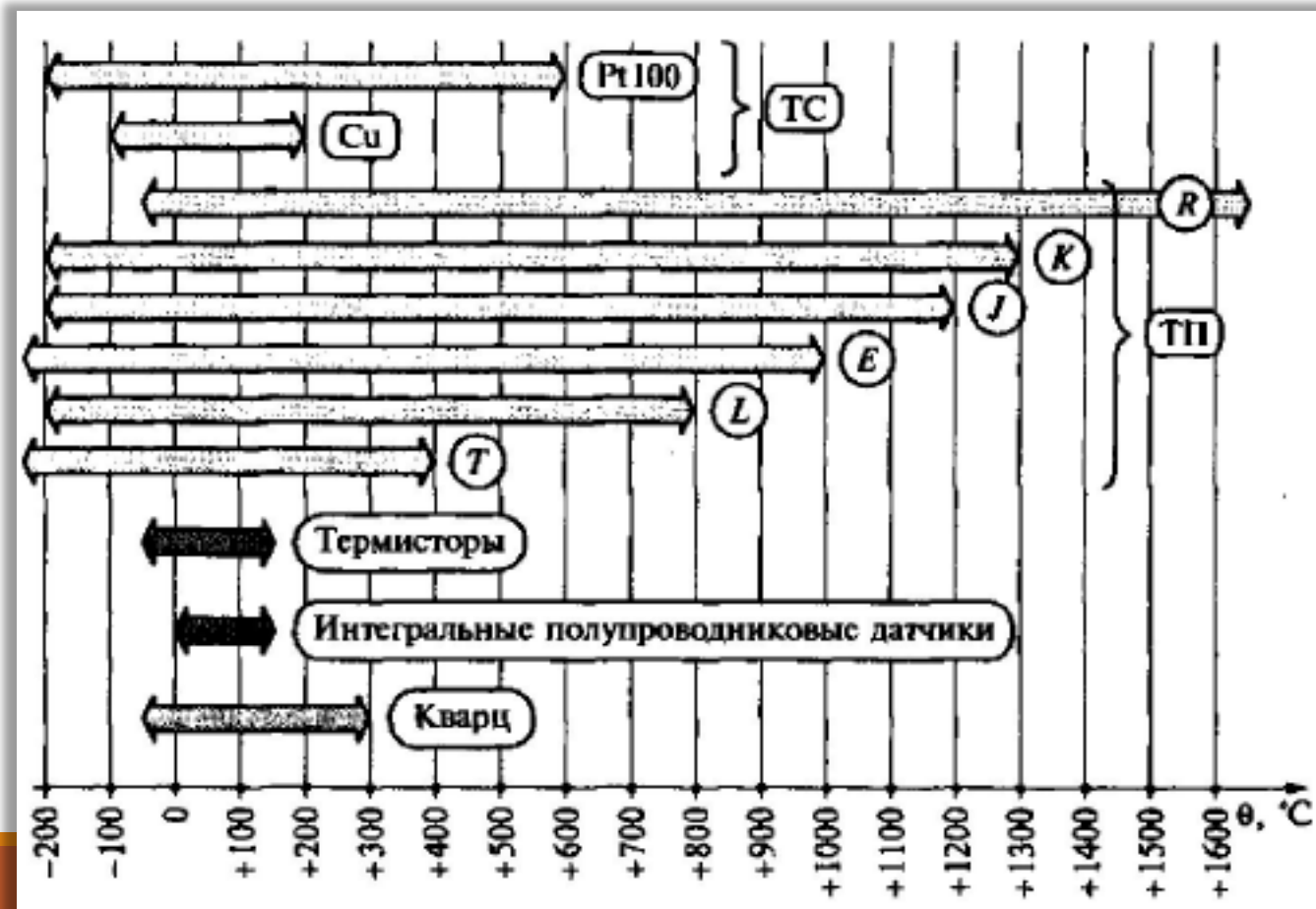


Рис. 8.7, *б* иллюстрирует подключение интегрального датчика тока. Выходной ток $I = f(\theta)$ датчика преобразуется посредством резистора R в пропорциональное напряжение и также подается на вход ЦВ или на вход АЦП, преобразующего далее это напряжение в цифровой код. Типичная чувствительность таких датчиков обычно составляет $1 \text{ мкА}/^\circ\text{С}$.

Сравнение возможностей различных датчиков. Сравнить возможности различных датчиков температуры позволяет диаграмма на рис. 8.8, где показаны ориентировочные диапазоны применения наиболее распространенных первичных измерительных преобразователей температуры: термометров сопротивления — платиновых (ТСР) и медных (ТСМ); термоэлектрических преобразователей — термопар различных типов; термисторов; интегральных полупроводниковых датчиков и кварцевых резонаторов.



Устройство и характеристики цифрового термометра. Рассмотрим один из наиболее распространенных вариантов устройства цифрового термометра (ЦТ), входным датчиком которого является ТП.

На рис. 8.9 приведена упрощенная структура контактного ЦТ, которая, естественно, напоминает структуру любого цифрового измерительного прибора.

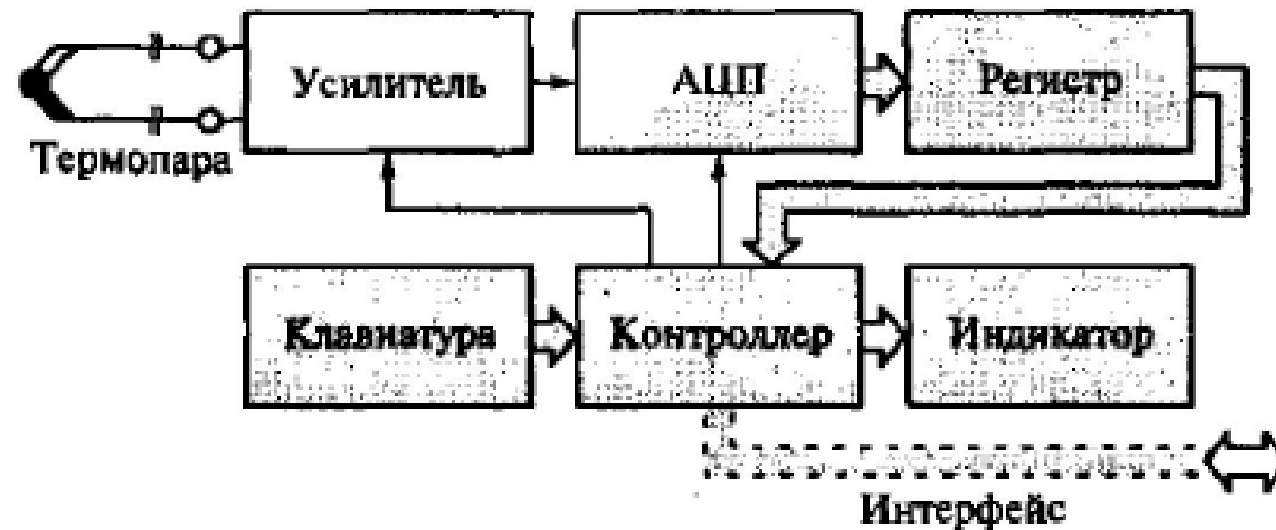


Рис. 8.9. Структура контактного цифрового термометра

Термопара подключается ко входу усилителя, назначение которого поднять уровень входного сигнала с единиц-десятков милливольт до единиц вольт. Аналого-цифровой преобразователь АЦП преобразует усиленный сигнал ТП в цифровой код, пропорциональный уровню термоЭДС и, следовательно, значению измеряемой температуры. В автономных ЦТ, как правило, применяются АЦП, использующие интегрирующие методы преобразования, обеспечивающие высокие точность, чувствительность, разрешающую способность, высокое подавление периодических помех общего и нормального вида, уровень которых может быть значительным. Выходной код АЦП запоминается (и затем некоторое время хранится) в регистре и выводится на цифровой индикатор (цифровое отсчетное устройство). Микропроцессорный контроллер управляет работой всех узлов прибора. Он же выполняет функцию линеаризации характеристики ТО. С помощью клавиатуры оператор задает режимы работы. В структуре прибора может присутствовать интерфейс для обмена информацией с внешними цифровыми устройствами (например, для передачи результатов регистрации в персональный компьютер и/или в систему автоматизированного управления).

Известны модели многоканальных ЦТ (чаще двухканальных). Отличие этих приборов — наличие коммутатора входных ТП, который позволяет поочередно подключать датчики ко входу усилителя. Двухканальные ЦТ обычно имеют режим измерения разности температур. Такие приборы называются дифференциальными термометрами.

Современные ЦТ отличаются малыми габаритами (Handheld — «удерживаемые в ладони») и массой (100...500 г), сравнительно низкой стоимостью, достаточно высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Основные технические характеристики типичного ЦТ

Диапазон измеряемых температур (для наиболее распространенных термопар типа К), °С	-200 ... +1000
Инструментальная основная абсолютная погрешность (без учета погрешности конкретной термопары)	±(0,2 % результата измерения + 0,5 °С)
Дополнительная погрешность при отклонении температуры окружающей среды от номинальной 20 °С (или 23 °С для некоторых зарубежных моделей)	±(0,01 % результата измерения + 0,05 °С) на каждый 1 °С отличия от номинальной температуры
Чувствительность, °С	0,1 ... 1,0
Разрядность АЦП, бит	10 ... 12
Диапазон рабочих температур, °С	0 ... +50
Питание	Батарея 9 В
Продолжительность непрерывной работы от одного комплекта источников питания, ч	30
Число входных каналов	1 ... 2

Возможна работа прибора с термопарами различных типов (например, K , J , T). Прибор имеет цифровой жидкокристаллический индикатор, простую понятную клавиатуру, размещен в пыле-влагозащищенном противоударном корпусе. Укомплектован несколькими термопарами различного конструктивного исполнения (для поверхностного измерения, воздушные, погружные, магнитные и др.).

Специфика контактных измерений температуры. Даже при очень точном измерителе (регистраторе) температуры можно получить большую погрешность результата из-за неправильной организации эксперимента, неудачной (неграмотной) установки датчиков на объекте. При контактных измерениях температуры поверхности необходимо учитывать следующие важные обстоятельства.

1. Если контакт датчика с объектом недостаточно хорош, мала площадь соприкосновения, то может иметь место слабая теплопередача от объекта к датчику. При этом в общем случае могут также возникать нежелательные тепловые потоки вдоль корпуса зонда (защитного чехла), которые также искажают результат измерения.

2. Датчик, установленный на поверхности объекта, в общем случае испытывает не только влияние интересующей экспериментатора температуры, но и температуры окружающей среды. Чем больше разница этих температур, тем сильнее может отличаться результат измерения от ожидаемого (от истинного) значения. Кроме того, может сказываться естественная конвекция воздуха вокруг датчика.

3. Если теплоемкость объекта мала (масса и габариты невелики как, например, в случае исследования температуры поверхности контактной клеммы низковольтного маломощного электропривода), то возможно сильное влияние датчика (особенно массивного) на температуру исследуемого объекта (искажение режима объекта). Это приводит к появлению значительной погрешности взаимодействия в статических измерениях и к заметной динамической погрешности при изменениях температуры объекта.

4. Если интересует температура горячей воды, текущей внутри трубопровода, и есть результат измерения температуры внешней поверхности этого трубопровода, то необходимо отдавать себе отчет в том, что это не одно и то же. Разность результата измерения и фактической температуры воды может быть весьма значительной (несколько градусов).

Классическим примером проявления этих эффектов может служить эксперимент по определению температуры θ_4 потока вещества (например, горячей воды), текущего внутри трубопровода, по результатам контактного измерения температуры θ_2 доступной внешней поверхности трубы при температуре окружающей среды θ_1 (рис. 8.10).

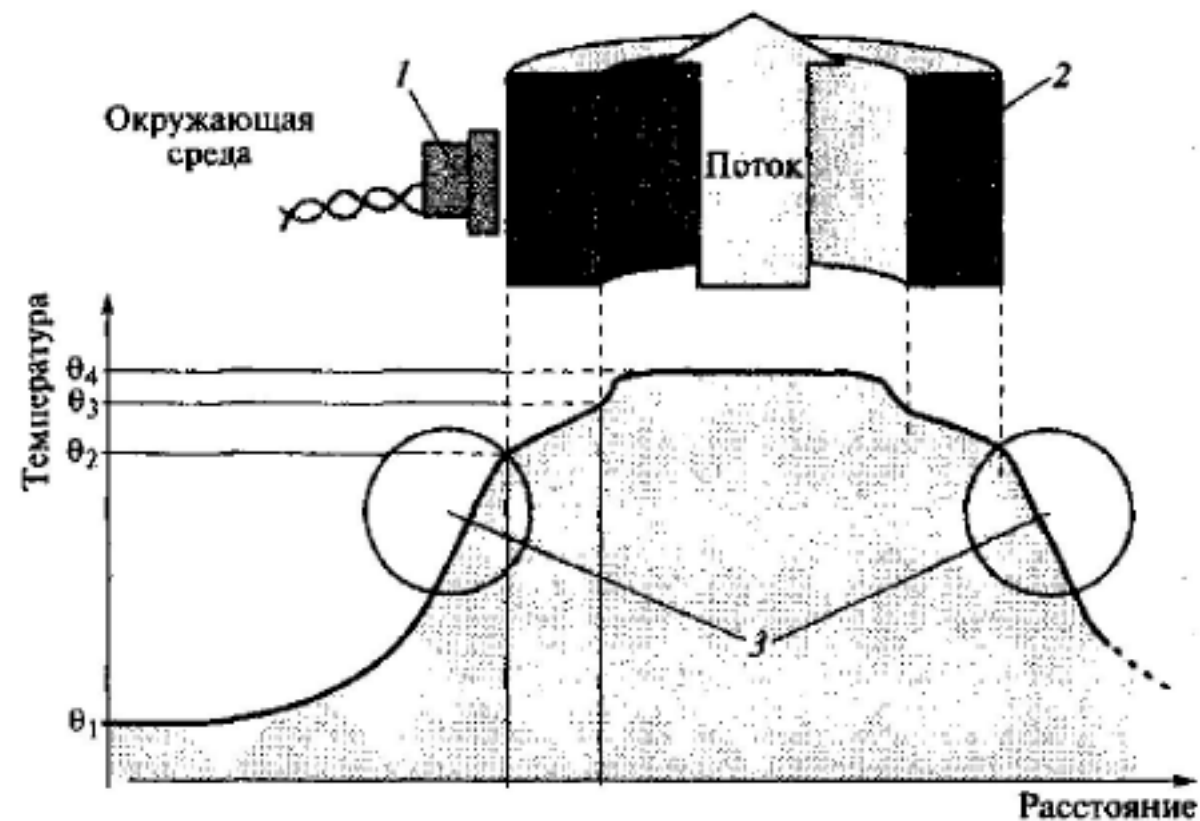


Рис. 8.10. Распределение температуры в пространстве:

θ_1 — температура окружающей среды; θ_2 — температура внешней поверхности трубы; θ_3 — температура внутренней поверхности трубы; θ_4 — температура потока;
 1 — датчик; 2 — трубопровод; 3 — зоны высокого градиента температур

Поскольку датчик (термопара, термометр сопротивления или термистор) в общем случае испытывает влияние значительно различающихся температур (температуры внешней поверхности трубы θ_2 и температуры окружающего воздуха θ_1), то в результате измерения можно получить некое усредненное (интегральное) значение, сильно отличающееся от истинного значения температуры θ_2 . И совсем не будет похож этот результат на фактическое значение температуры θ_4 собственно потока среды, интересующей специалиста. Основные причины такого искажения результата — наличие значительного градиента (разницы) температур внешней стенки и окружающей среды и заметный градиент температур между внешней и внутренней стенками трубопровода.

Понятно, что для получения достаточно точных результатов при организации экспериментов по контактному измерению температуры необходимо тщательно продумывать установку датчиков на поверхности объекта, представлять возможное распределение температур. Можно сформулировать некоторые типовые рекомендации по организации подобных экспериментов. Важно обеспечить хороший *тепловой контакт* датчика с объектом. *Поверхность* (площадь) *соприкосновения* датчика с объектом должна быть *максимально возможной*. Желательно использовать *теплопроводящие пасты*, улучшающие теплопередачу от объекта к датчику. Необходимо позаботиться о *теплоизоляции датчика* в целях максимального уменьшения влияния окружающей среды. Применение даже простых подручных средств может дать хороший эффект (стекловата, обычная сухая ткань, резина и т.п.). При статических измерениях полезно дождаться *установившегося режима*, т.е. не торопиться фиксировать результат. При исследовании объектов с малой массой или быстропротекающих процессов необходимо использовать датчики с *малой собственной массой*, особенно в экспериментах, где важна малая динамическая погрешность.

Бесконтактные методы и средства измерений

Устройство ИК-термометра. Методы и приборы бесконтактного ИК-измерения основаны на количественной оценке инфракрасного (теплого) излучения объекта. Тепловое излучение обладает практически теми же свойствами, что и видимый человеком свет: распространяется прямолинейно, способно отражаться, преломляться, проникать сквозь некоторые тела, может быть сфокусировано оптической системой линз (не обязательно прозрачных) и т. п.

На рис. 8.12 показана упрощенная структура ИК-термометра.

Тепловое излучение поверхности объекта объективом прибора фокусируется на приемник, в роли которого часто выступает термопара. ТермоЭДС термопары усиливается усилителем $Ус$, преобразуется аналого-цифровым преобразователем АЦП в цифровой код, который некоторое время хранится в запоминающем регистре $Рг$ и представляется на индикаторе результатом измерения. Объектив ИК-измерителя одновременно выполняет функцию полосового фильтра частот.

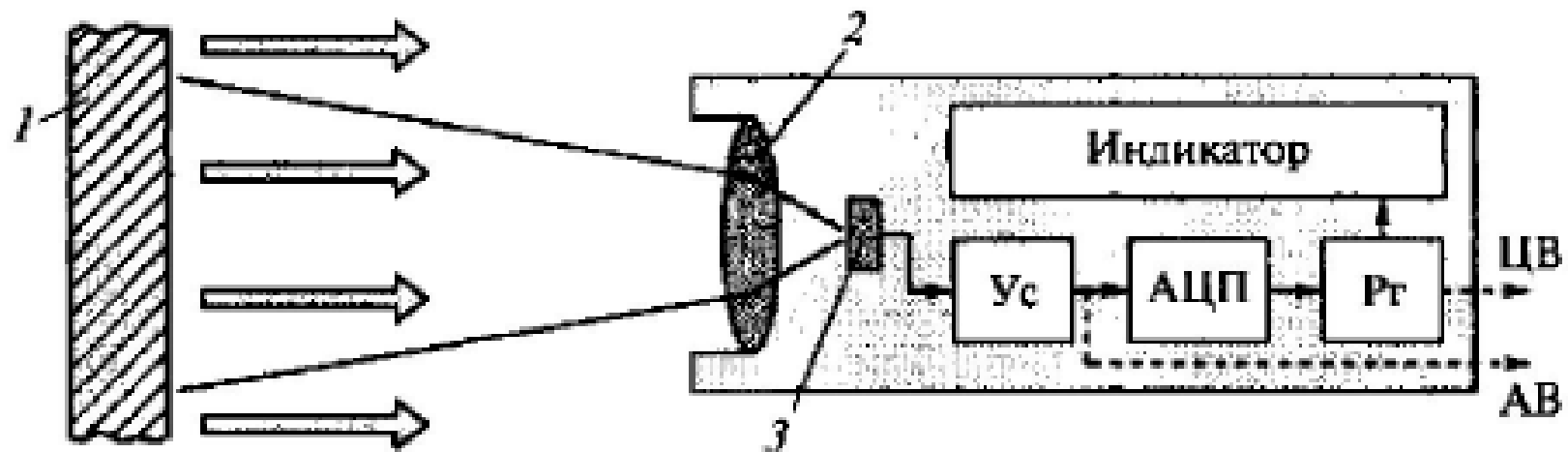


Рис. 8.12. Упрощенная структура ИК-термометра:

1 — объект; *2* — объектив; *3* — приемник

Инфракрасный измеритель может также содержать узлы связи (аналоговой или цифровой) с внешними устройствами. На рис. 8.12 показаны аналоговый АВ и цифровой ЦВ выходы. Наличие у ИК-термометра выхода аналогового сигнала, пропорционального текущему значению измеряемой температуры, позволяет подключить прибор к внешнему аналоговому самопишущему прибору или к цифровому измерительному регистратору.

Для задач длительного мониторинга применяются также ИК измерительные преобразователи. Эти устройства не имеют индикатора, их выходной аналоговый сигнал представлен пропорциональным измеряемой температуре током (например, 4...20 мА) или напряжением (например, 0...5 В). Они предназначены для работы совместно с показывающими приборами или регистраторами в составе измерительных установок, комплексов или систем.

Специфика применения ИК-измерителей. При бесконтактных измерениях температуры с помощью ИК-термометров или преобразователей необходимо иметь в виду некоторые важные особенности.

Поскольку количество излучаемой объектом энергии зависит не только от температуры, но также и от качества поверхности тела, то для обеспечения достоверных результатов необходимо знать (или заранее экспериментально определить) значение коэффициента излучения (Emission) поверхности конкретного объекта ϵ . Абсолютно черное тело ($\epsilon = 1$) гораздо лучше «отдает» теплоту, чем объект с блестящей гладкой поверхностью. Перед началом измерения необходимо ввести в прибор значение поправки, соответствующей свойствам материала поверхности объекта, и тогда прибор автоматически будет корректировать показания, компенсируя недостаточную излучающую способность исследуемой поверхности. Такие поправки (так называемые поправки на «неполную черноту») обычно приводятся в Инструкции по эксплуатации или в паспорте ИК-прибора.

Если материал поверхности конкретного исследуемого объекта не описан в таблице поправок (коэффициентов излучения ϵ) прибора, то можно оценить значение необходимой поправки экспериментально, например следующим образом. В тех случаях, когда это возможно, нужно измерить температуру исследуемой поверхности контактным термометром. Затем, перебирая разные значения поправки ИК-термометра, следует добиться одинаковых показаний обоих приборов.

Инфракрасные термометры не рекомендуется использовать при исследовании блестящих, полированных поверхностей, неокисленных металлов типа хрома, алюминия, нержавеющей стали, латуни и т. п. Если исследуемая поверхность обладает малой излучающей способностью, целесообразно покрыть ее тонким слоем матовой черной краски или сажи. Это не повлияет на фактическую температуру поверхности, однако позволит повысить достоверность результатов, так как увеличит излучающую способность до $\epsilon = 0,9 \dots 0,96$.

Следует помнить, что значение коэффициента излучательной способности зависит не только от качества поверхности, но и от температуры объекта.

Отношение расстояние/диаметр мишени. Оптическое взаимодействие ИК-термометра (преобразователя) с поверхностью объекта определяется основанием конуса. Чем больше расстояние L до объекта, тем больше размеры (в частном случае диаметр D) и площадь зоны (мишени), с которой воспринимается излучение. Возможности оптики конкретного ИК-прибора определяются отношением расстояние/диаметр (L/D) для плоскости мишени, перпендикулярной оси объектива (рис. 8.13). Иногда эта характеристика называется «показателем визирования».

Для различных ИК-устройств при одном и том же удалении от объекта диаметры мишени на поверхности будут различны. Например, при расстоянии $L = 1$ м для измерителя с отношением $L/D = 100/1$ диаметр мишени $D_1 = 1,0$ см; для прибора с отношением $L/D = 40/1$ диаметр мишени $D_2 = 2,5$ см; для прибора с отношением $L/D = 8/1$ диаметр мишени $D_3 = 12,5$ см. Чем больше это отношение, тем более мелкие фрагменты поверхности можно обследовать автономно.

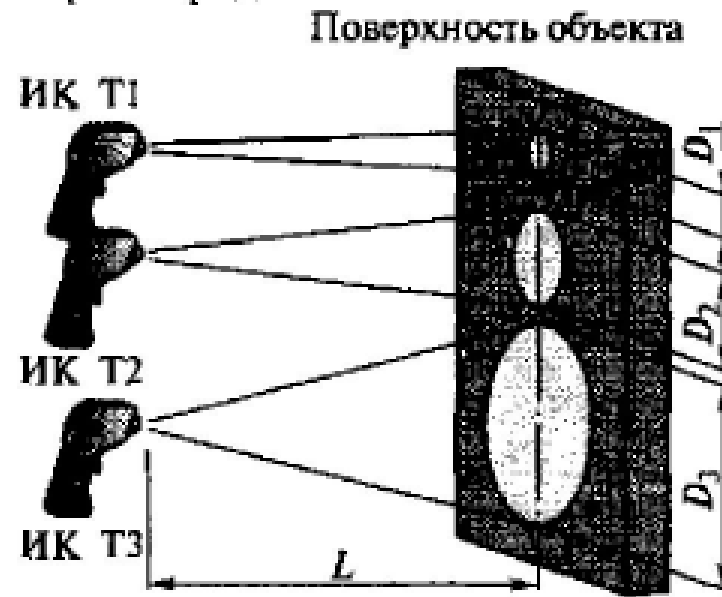


Рис. 8.13. Отношение расстояние/диаметр

Интегральная температура. Необходимо учитывать, что ИК-измеритель воспринимает некую интегральную излучаемую энергию, т.е. оценивает интегральную (усредненную) температуру, характеризующую всю площадь зоны контроля (мишени). И если объект меньше размеров мишени, то результат измерения может быть сильно искажен за счет влияния температуры фона (которая может быть как гораздо больше, так и заметно меньше температуры интересующего объекта). На рис. 8.14 показан пример возможной ситуации, результат измерения в которой будет сильно отличаться от ожидаемого (правильного) значения температуры.

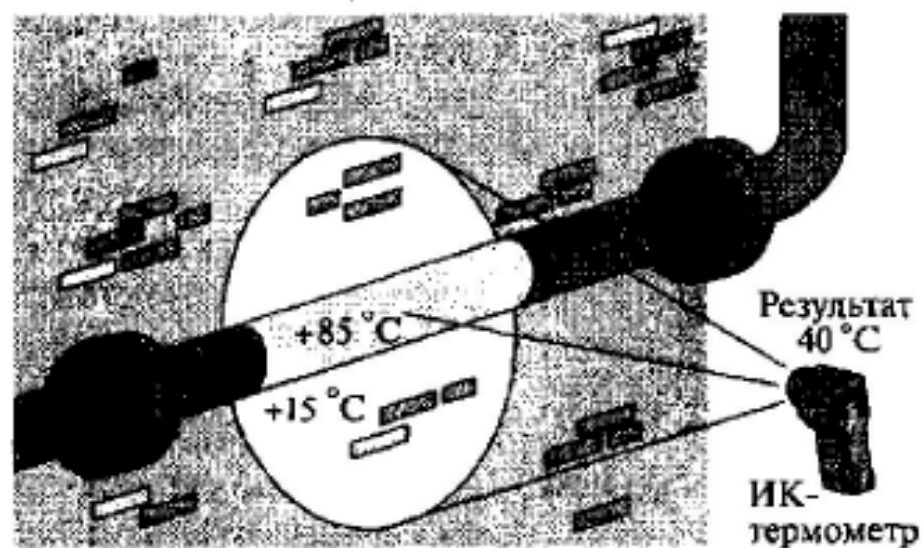


Рис. 8.14. Влияние температуры фона

Например, показания ИК-термометра, направленного на трубопровод системы горячего водоснабжения, составили $\theta = 40^\circ\text{C}$, хотя температура трубопровода (та, что собственно и интересует

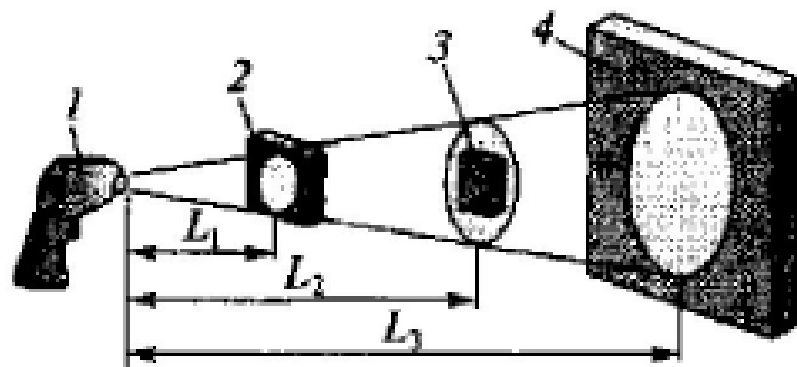


Рис. 8.15. Соотношение размеров объектов и мишени:

1 — ИК-термометр; 2 — объект 1; 3 — объект 2; 4 — объект 3

Если имеется только один прибор, то необходимо выбирать такое расстояние до исследуемого объекта, чтобы размеры мишени были не больше размеров интересующего нас фрагмента объекта. На рис. 8.15 показаны некоторые возможные варианты соотношения размеров объектов и мишени.

нас в данном эксперименте) равна $+85^\circ\text{C}$, а температура фона (стены) $+15^\circ\text{C}$.

Если есть возможность выбирать из нескольких ИК-инструментов, то необходимо использовать такой, соотношение расстояние/диаметр которого позволяет избавиться от влияния ненужных фрагментов (от интегральной температуры), т.е. измерять только температуру интересующего нас фрагмента.

Очевидно, что второй случай (расстояние до объекта L_2) — пример неудачного выбора расстояния, так как зона контроля (мишень) при этом имеет бóльшую площадь, чем объект, и прибор неизбежно отреагирует и на окружающий фон. Первый случай (расстояние до объекта L_1) — пример предельного расположения, т. е. максимально возможного расстояния, необходимого для обеспечения корректного результата для данных размеров объекта. Третий случай (L_3) — наиболее предпочтительный вариант. Общая рекомендация: если возможно, то следует выбирать такое расстояние до исследуемого объекта, при котором размеры объекта были бы примерно вдвое больше мишени (зоны контроля).

Суммарное излучение. В общем случае воспринимаемое ИК-термометром излучение складывается из трех составляющих: *собственно излучения* поверхности объекта, *отраженного излучения* других объектов (источников), а также *проникающего излучения* источников, расположенных за объектом (рис. 8.16).

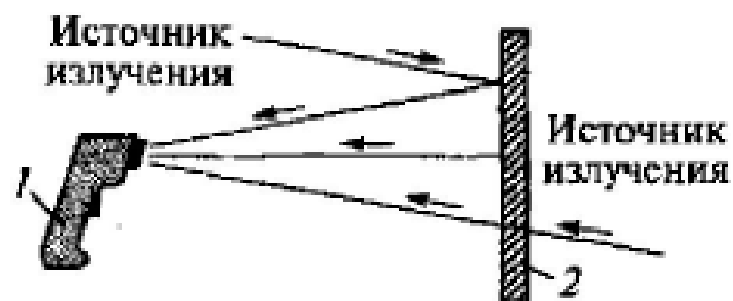


Рис. 8.16. Влияние побочных излучений:

1 -- ИК-термометр; 2 — исследуемая поверхность

метр так, чтобы его оптическая ось была перпендикулярна исследуемой поверхности.

По возможности, следует избегать влияния этих нежелательных источников (или уменьшать их), так как они могут сильно повлиять на результат измерения. При работе с гладкими (шлифованными) поверхностями (например, полированный металл, стекло, вода) для уменьшения влияния отраженных тепловых излучений других источников необходимо направлять ИК-термо-

Инерционность ИК-измерителей. В большинстве случаев измерения ИК-приборами можно выполнять существенно быстрее, чем контактными, поскольку нет затрат времени на установку датчиков, на ожидание установления процесса теплообмена между объектом и датчиком.

Типичный выигрыш в быстродействии — десятки — сотни раз. Например, установка термопары на трубопровод, обеспечение теплоизоляции, достижение установившихся показаний прибора может потребовать 10 ... 20 мин, а для получения результата ИК-измерения достаточно 5 ... 10 с.

Особенно ярко это преимущество проявляется в экспериментах, где требуется выполнить множество однотипных измерений, например при обследовании системы теплоснабжения многоэтажного дома, когда необходимо определять значения температуры в десятках — сотнях точек.

Однако необходимо помнить, что у входного датчика (приемника) ИК-термометра тоже существует определенная тепловая инерционность, и может потребоваться несколько секунд (а может быть и десятков секунд) для установления показаний при переходе от поверхности с высокой (например, близкой к максимально возможной) температурой к поверхности с низкой температурой.

Особенно важно знать инерционность измерителя при регистрации быстроменяющихся температур.

Лазерные указатели. Работая с обычным простым (дешевым) ИК-термометром (не имеющим лазерного указателя — рис. 8.17, *a*), не всегда можно четко представить себе контур и расположение зоны излучения (мишени).

В этом случае возможна значительная ошибка в определении температуры.

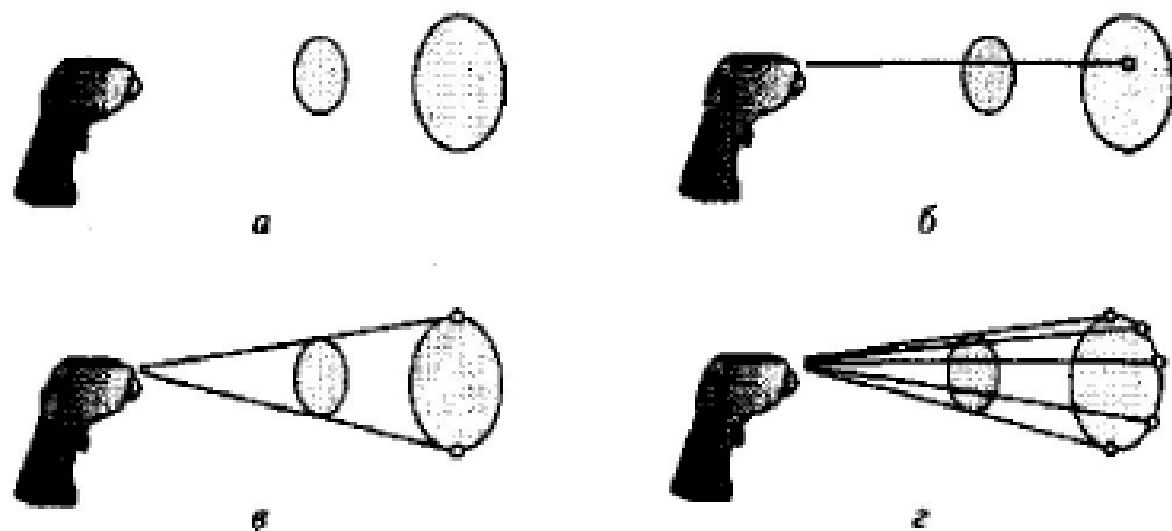


Рис. 8.17. Варианты организации лазерных указателей:
a — без указателя; *б* — один луч; *в* — два луча; *з* — 8 лучей

Для уверенного определения центра, границ, размеров этой зоны предназначены лазерные указатели (иногда называемые прицелами).

Эти приспособления заметно облегчают точное наведение объектива прибора на требуемый участок поверхности, позволяют правильно выбрать расстояние до объекта, в некоторых случаях показывают даже контур зоны.

В современных моделях ИК-термометров используются разные варианты организации лазерных указателей (прицелов).

Простейший случай (рис. 8.17, б) — один лазерный луч, показывающий на исследуемой поверхности середину (реже — верхний край) мишени.

Второй вариант (рис. 8.17, в) — более удобный — два расходящихся луча, показывающих на изучаемой поверхности концы диаметра круга мишени.

Третий вариант (рис. 8.17, *г*) — многолучевой (конечно, самый удобный, но и самый дорогой). В этом варианте множество расходящихся лучей (например, 8) светящимися точками однозначно отображают на поверхности круговой образ мишени.

Необходимо знать, что включение лазерных прицелов значительно увеличивает мощность потребления прибора (примерно в 5... 10 раз), поэтому целесообразно отключать этот режим всякий раз, когда в его использовании нет необходимости. Кроме того, при выборе и покупке ИК-измерителя полезно помнить, что наличие лазерного указателя заметно увеличивает стоимость прибора, особенно, если этих указателей несколько. Следует помнить также, что лазерный целеуказатель является источником опасного для глаз излучения и поэтому требует соблюдения особых правил эксплуатации.

Режимы запоминания значений. Многие современные модели ИК-термометров имеют полезные режимы определения и фиксации максимального, минимального и среднего значений температуры, которые имели место за время эксперимента, с возможностью последующего просмотра.

Кроме того, есть приборы с режимами определения значений температуры, превышающих значение заданного оператором порога (уставки).

Это позволяет, выполняя сканирование исследуемой поверхности, легко найти участки поверхности с температурой, выше заданной.

Аналогичным образом можно обеспечить поиск участков с температурой ниже запрограммированной уставки. При этом обычно появление результатов измерения, которые выше или ниже уставки (в зависимости от заданного режима), сопровождается звуковым сигналом, дополнительно обращающим внимание на состоявшиеся события.

Примеры применения ИК-измерителей. ИК-термометр удобно использовать при обследовании состояния электрических контактов, плавких вставок, соединительных проводников в различных электрических силовых распределительных устройствах и т. п. На рис. 8.18 показан пример определения температуры контактных соединений, находящихся под высоким напряжением. Таким способом можно быстро и, главное, безопасно проверить множество контактов, выявить среди них перегревающиеся соединения и предотвратить тем самым аварийные ситуации.

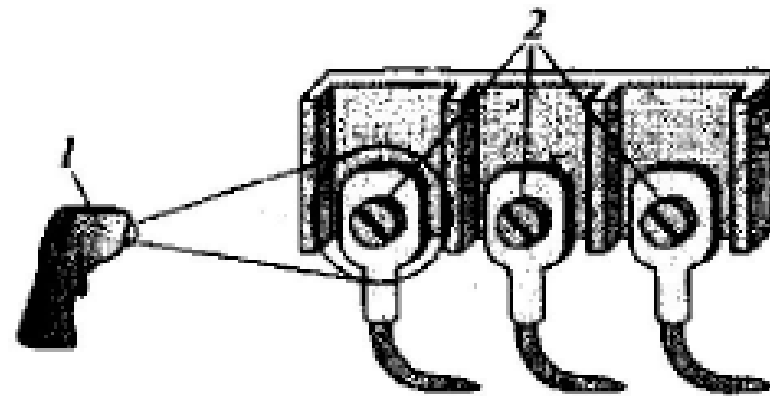


Рис. 8.18. Измерение температуры контактных соединений:
1 — ИК-термометр; 2 — контактные соединения

ИК-техника позволяет легко обследовать электропривод. Перегрев двигателей, температуру подшипников удобно измерять с помощью ИК-приборов и преобразователей (рис. 8.19). В этом случае, как и в предыдущем примере, ИК-термометр можно также использовать для оценки температуры электрических соединений.

В целях получения общей картины температурного поля можно использовать ИК-термометр для сканирования как неподвижных, так и движущихся поверхностей и предметов (рис. 8.20).

ИК-термометром можно измерять и температуры ниже 0°C . Есть модели, способные измерять температуры от -50°C . Но при этом следует помнить, что сам прибор (как и большинство миниатюрных приборов с малопотребляющим жидкокристаллическим индикатором) обычно имеет диапазон рабочих температур $0 \dots +40^{\circ}\text{C}$. Поэтому для нормальной работы необходимо не допускать переохлаждения самого прибора.

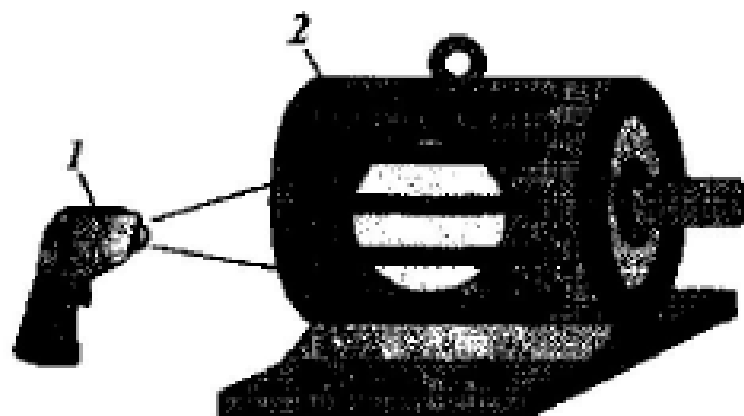


Рис. 8.19. Оценка состояния электропривода:

1 — ИК-термометр; 2 — двигатель

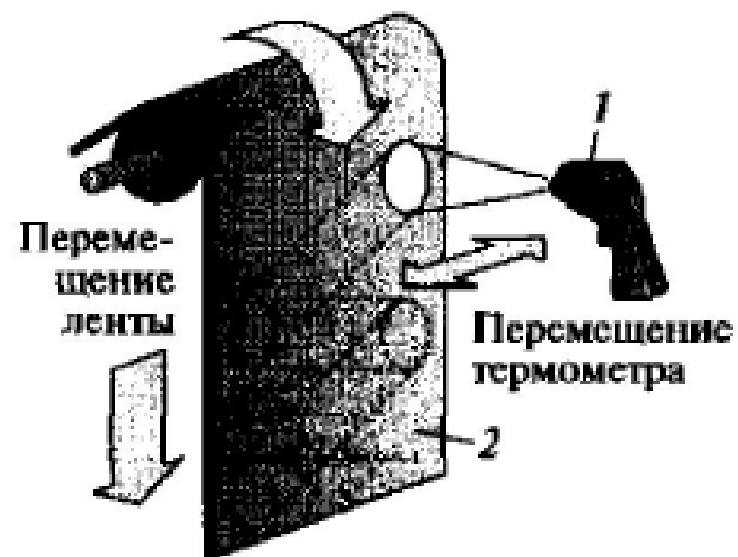


Рис. 8.20. Сканирование движущихся поверхностей:

1 — ИК-термометр; 2 — лента



Рис. 8.21. Аналоговая регистрация температуры:

1 — ИК-термометр; 2 — аналоговый самопишущий прибор

Все модели ИК-преобразователей и многие модели ИК-термометров имеют выход аналогового сигнала, пропорционального результату измерения. Поэтому можно легко организовать длительную регистрацию изменяющейся температуры поверхности объекта с помощью аналоговых или цифровых измерительных регистраторов.

Аналоговый сигнал ИК-термометра или преобразователя может быть подан на вход самопишущего прибора (рис. 8.21). Внешний прибор, к которому подключается ИК-измеритель (выходным сигналом которого является напряжение), должен иметь достаточно высокое входное сопротивление (обычно не менее 100 кОм).

Может быть использован и цифровой измерительный регистратор (логгер) (рис. 8.22). В этом случае (в отличие от использования аналоговых самописцев) по окончании эксперимента массив цифровых данных переписывается в персональный компьютер для последующей автоматизированной обработки и представления информации.

Некоторые типы измерителей имеют даже выход цифрового сигнала (кода текущего результата измерения), что позволяет сразу передавать информацию в персональный компьютер для анализа и представления данных.

При регистрации быстроменяющихся температур важно учитывать инерционность измерителя. Типичное время установления показаний ИК-измерителей составляет 1...10 с.

Интересным и перспективным направлением развития инфракрасной термометрии является *тепловидение* (или термовидение, или термография). Тепловизионная техника позволяет получить растровое изображение поверхности объекта — термограмму, по которой, как по фотографии, можно оценить значения температуры отдельных фрагментов поверхности.

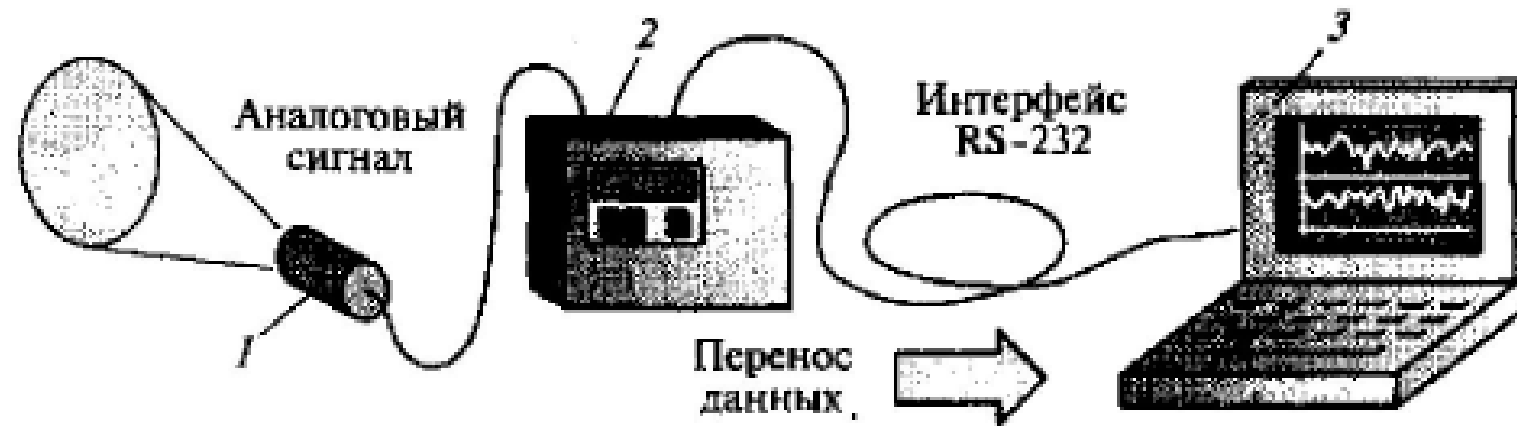


Рис. 8.22. Цифровая регистрация температуры:

1 — ИК-преобразователь; 2 — цифровой регистратор; 3 — компьютер

Измерение давления

Давление есть отношение силы к площади. Наиболее понятное проявление физической силы — это вес тела. Как известно, вес тела, т.е. сила F , с которой тело стремится вниз (давит на поверхность), определяется не только его массой m , но и ускорением свободного падения g :

$$F = mg.$$

На поверхности Земли в обычных условиях значение ускорения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

На разных этапах исторического развития человечества физическая величина — сила (вес) выражалась различными единицами. Некоторые из них сохранились до сих пор: килограмм силы (кгс, ранее обозначавшийся кГ), дина. Сегодня основной единицей выражения силы в системе SI является ньютон (Н):

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

Рассмотрим проявление давления в природе. Воздух, окружающий планету Земля (атмосфера), хоть и кажется невесомым, имеет вполне определенную массу. Вследствие силы притяжения весь объем воздуха создает определенное атмосферное давление.

В соответствии с международной системой физических единиц за единицу давления принят паскаль (Па), который равен давлению, создаваемому силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной на площади в 1 м^2 , т.е. $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Однако обычно атмосферное давление измеряется в миллибарах [$1 \text{ мбар} = 0,001 \text{ бар} = 10^3 \text{ г/(см}\cdot\text{с}^2)$], миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.) или в гектопаскалях (гПа). При этом $1 \text{ мбар} = 1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 1,33 \text{ мбар} = 133,3 \text{ Па}$.

Плотность воздуха ρ не постоянна, а зависит от нескольких факторов, в частности от температуры, относительной влажности, давления. В зависимости от условий значение ρ может меняться в диапазоне $1,1 \dots 1,3 \text{ г/л}$. Для простоты будем считать плотность воздуха в нормальных условиях равной 1 г/л .

Таким образом, масса 1 л воздуха составляет примерно 1 г. Если представить этот объем воздуха (1 л) в виде столба высотой 10 м и

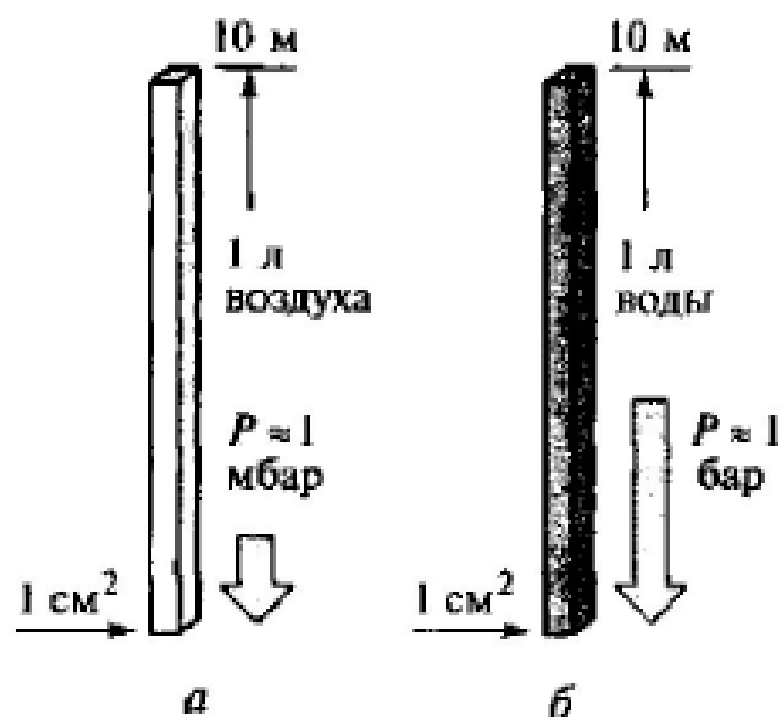


Рис. 8.23. Давление воздуха (а) и воды (б)

площадью в основании 1 см^2 (рис. 8.23, а), то создаваемое им давление

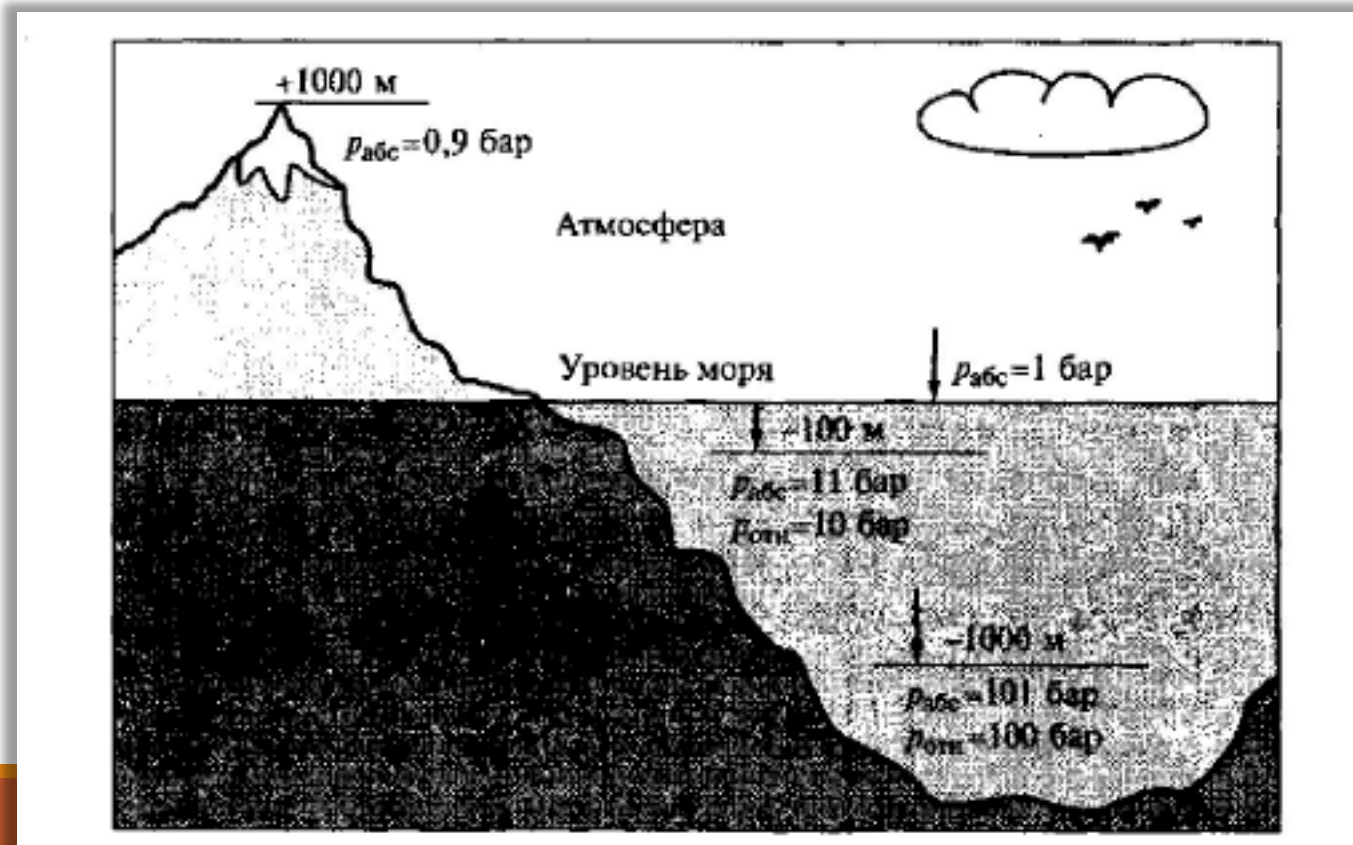
$$\begin{aligned} p &= mg/1 \text{ см}^2 = \\ &= (1 \text{ г} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2)/1 \text{ см}^2 = \\ &= 980 \text{ г}/(\text{с}^2 \cdot \text{см}) \approx 1 \text{ мбар}. \end{aligned}$$

Вода имеет в 1000 раз большую плотность — 1 л воды имеет при нормальных условиях массу примерно 1 кг. Столб воды высотой 10 м и площадью в основании 1 см^2 создает давление (рис. 8.23, б):

$$p = mg/1 \text{ см}^2 = (1 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2)/1 \text{ см}^2 = 980 \text{ кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{см}) \approx 1 \text{ бар}.$$

Существуют два исходных понятия физической величины «давление», отличающиеся точкой отсчета значения: абсолютное и относительное (дифференциальное). *Абсолютное* давление — это давление, отсчитываемое от абсолютного нуля (вакуума). *Дифференциальное* давление представляет собой разность (перепад) давлений.

Абсолютное давление $p_{абс}$ атмосферного воздуха на уровне моря составляет 1 бар. На высоте 1000 м над уровнем моря давление атмосферы меньше на 100 мбар и составляет 900 мбар (рис. 8.24).



Под водой давление растет гораздо быстрее: на 1 бар на каждые 10 м. На глубине 100 м ниже уровня моря абсолютное давление $p_{\text{абс}}$ составляет 11 бар (10 бар — давление собственно воды плюс 1 бар — атмосферное давление воздуха). Относительное давление $p_{\text{отн}}$ (по отношению к давлению у поверхности воды) равно 10 бар. На глубине 1000 м абсолютное и относительное давления, соответственно, 101 и 100 бар.

Средства измерения давления

В настоящее время используются разнообразные методы и средства измерения давления. Средства измерения давления (манометры, вакуумметры, барометры) по физическим эффектам, положенным в основу принципа действия первичного измерительного преобразователя (датчика), делятся на несколько групп. Наибольшее распространение получили *жидкостные* (в которых измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости); *деформационные* (в которых значение деформации упругого чувствительного элемента пропорционально измеряемому давлению); *тензометрические* (основанные на тензометрическом эффекте материалов) средства измерения. Нас, конечно, будут интересовать только электрические методы и средства измерения давления. В свою очередь, электрические манометры делятся на *аналоговые* и *цифровые*. Первые — простые, достаточно надежные, дешевые приборы и потому широко распространены в задачах стационарных измерений на промышленных объектах. Цифровые манометры дают возможность организации автоматизированных измерений, позволяют решать как задачи длительной регистрации, так и задачи управления технологическими процессами.

Переход к электрическим выходным сигналам первичных преобразователей может быть организован по-разному. Для преобразования перемещения упругого элемента в электрический сигнал используются различные вторичные измерительные преобразователи: индуктивные/индукционные (меняется индуктивность катушки или взаимная индуктивность двух катушек), трансформаторные (меняется выходное напряжение трансформатора), резистивные (меняется сопротивление, например, тензодатчика), емкостные (меняется емкость датчика) и др. Рассмотрим некоторые из возможных вариантов преобразования давления в электрический сигнал.

Трансформаторные преобразователи. Один из вариантов перехода к электрическому выходному сигналу представлен на рис. 8.25.

В основе конструкции механической части — мембранная коробка 1, герметично разделенная на две части упругой мембраной 2. Под воздействием разности входных давлений p_1 и p_2 , поступающих в обе части коробки 1, мембрана 2 прогибается, перемещая при этом сердечник 3 дифференциального трансформаторного преобразователя 4. Перемещение сердечника изменяет исходное равновесие мостовой схемы, образованной двумя одинаковыми половинами L вторичной обмотки трансформатора и двумя равными резисторами R . При этом выходной сигнал моста $U_{\text{вых}}$ изменяется пропорционально перемещению сердечника и, следовательно, измеряемому давлению или разности давлений p_1 и p_2 . Это выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ можно просто измерить вольтметром переменного напряжения.

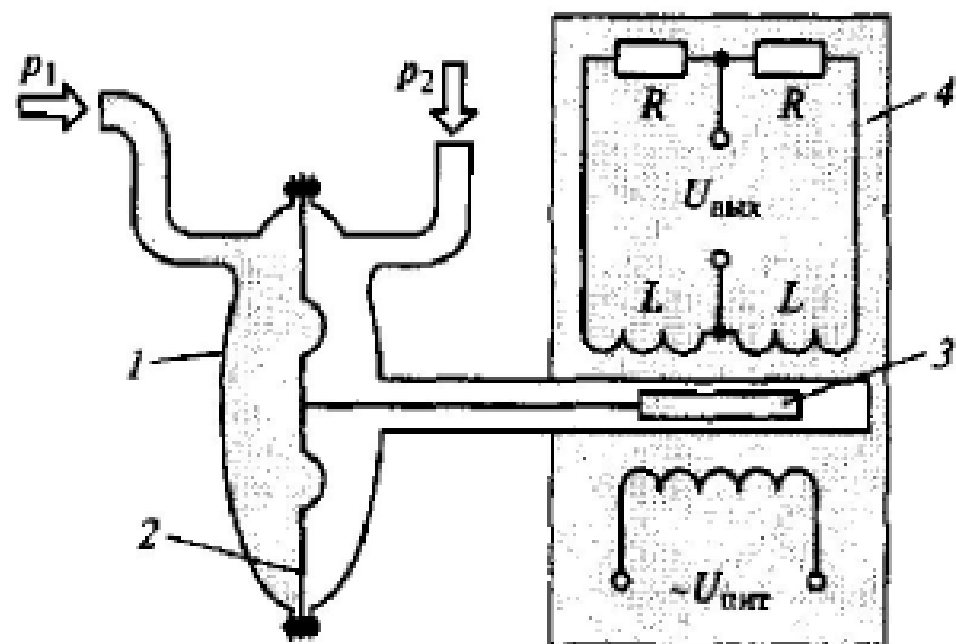


Рис. 8.25. Манометр с электрическим выходным сигналом:

1 — мембранная коробка; 2 — мембрана; 3 — сердечник; 4 — дифференциальный трансформаторный преобразователь

Тензометрические преобразователи. Сегодня все большее распространение находят манометры с тензометрическими чувствительными элементами, которые закреплены на деформируемых под воздействием измеряемого давления поверхностях.

Тензометрический эффект проявляется в изменении электрического сопротивления проводников (или полупроводников) при изменении геометрии (например, при изгибе) проводника. Тензорезисторы часто выполняются из тонкой металлической фольги (например, медной) и представляют собой достаточно длинный проводник, компактно уложенный в плоскости поверхности упругой пластины или мембраны (рис. 8.26).

Обычно (для повышения чувствительности измерения) устанавливают два тензорезистора — на противоположные поверхности пластины. Эти датчики жестко крепятся (приклеиваются) к пластине и изгибаются вместе с ней.

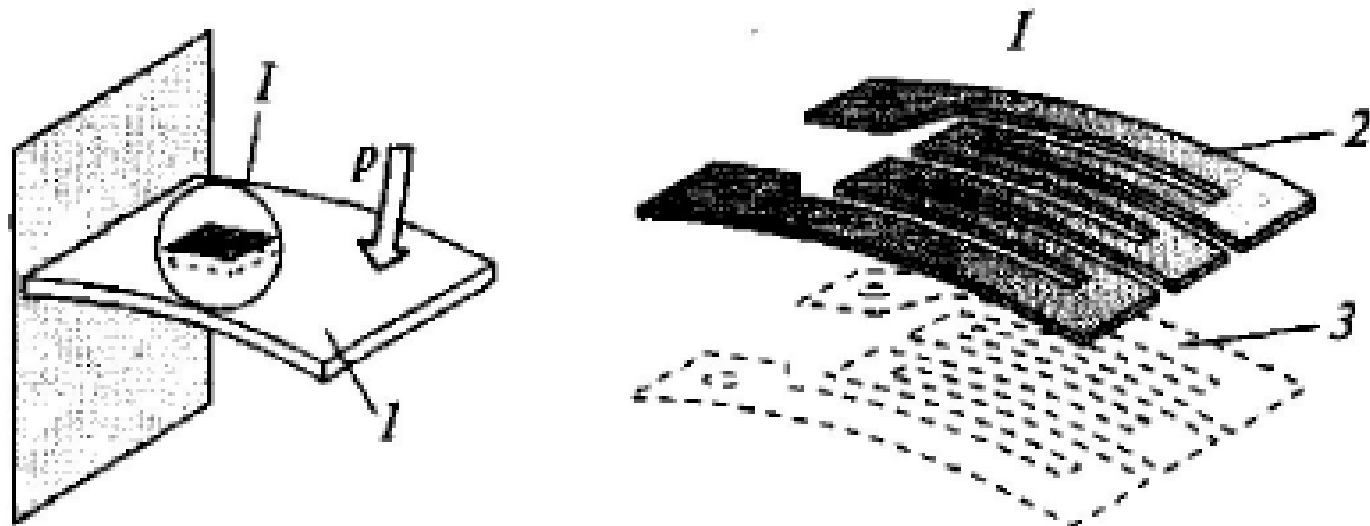


Рис. 8.26. Тензометрический эффект:

1 — упругая пластина; 2 — 1-й тензорезистор ($R_0 + \Delta R$); 3 — 2-й тензорезистор ($R_0 - \Delta R$)

Если исследуемое давление p изгибает упругую пластину вниз, то длина верхнего тензорезистора увеличивается, его сечение уменьшается и сопротивление его растет: $R_0 + \Delta R$. У расположенного на нижней поверхности пластины датчика — все наоборот, в результате действия давления p его сопротивление уменьшается: $R_0 - \Delta R$. Эти изменения сопротивления легко могут быть представлены электрическим сигналом тока или напряжения. Обычно тензорезисторы включаются в мостовые схемы (неуравновешенные мосты) — рис. 8.27.

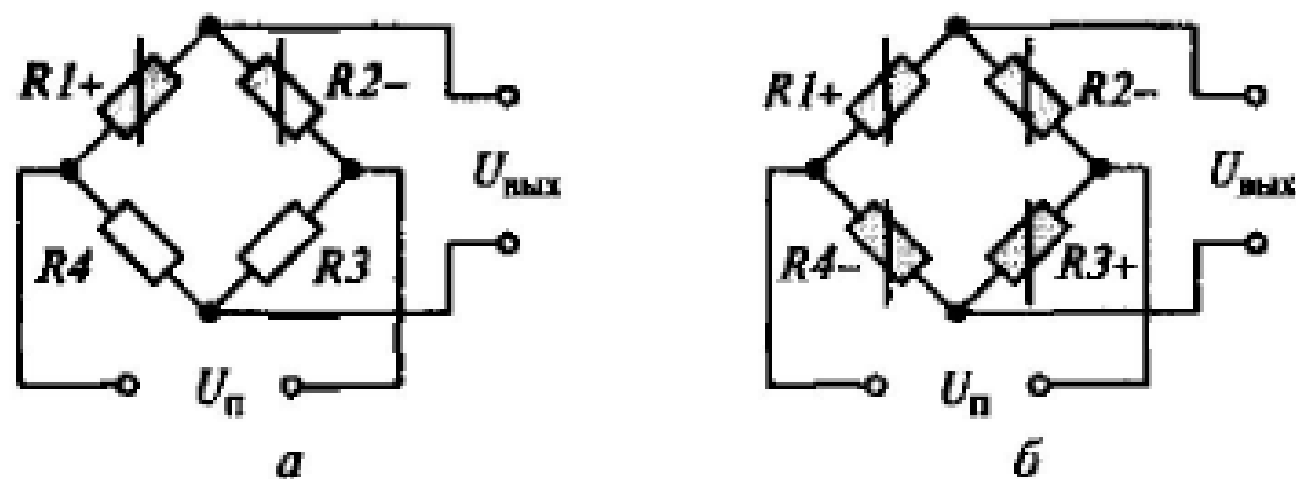


Рис. 8.27. Варианты мостовых схем:

a — с двумя тензодатчиками; *б* — с четырьмя тензодатчиками

Выходное напряжение неуравновешенного моста $U_{\text{вых}}$ зависит от изменения сопротивлений плеч моста. Достаточно иметь хотя бы один тензорезистор, но для обеспечения линейности преобразования целесообразно включать в соседние плечи моста два одинаковых (см. рис. 8.27, а), но с различными знаками изменения сопротивления при изгибе пластины (сопротивление резистора $R1$ увеличивается, а $R2$ – уменьшается). Для повышения чувствительности часто используют четыре тензорезистора (см. рис. 8.27, б). Включают их таким образом, чтобы в соседних плечах моста стояли датчики с противоположными изменениями значений сопротивлений. Если в мостовой схеме все датчики одинаковы, имеют равные номинальные значения сопротивлений R и равные модули изменения ΔR при воздействии давления, то выходное напряжение моста $U_{\text{вых}}$ можно выразить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}}(\Delta R/R),$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания моста.

Далее это напряжение может быть измерено аналоговыми измерителями или преобразовано в цифровой код, который, в свою очередь, может быть выведен на цифровой индикатор, сохранен или передан другим устройствам. Структура собственно цифрового манометра практически не отличается от структуры других цифровых приборов.

Тензометрический принцип успешно используется и для построения дифференциальных манометров. При этом также может быть использована традиционная механическая конструкция: мембранная коробка из двух герметично изолированных частей (камер), прогибающаяся мембрана между ними, на которой жестко закреплены (например, приклеены) тензорезисторы.

Современные микроэлектронные технологии обеспечивают широкие возможности создания миниатюрных чувствительных элементов (датчиков) манометров. Упрощенное устройство микроэлектронного резистивного тензометрического датчика показано на рис. 8.28.

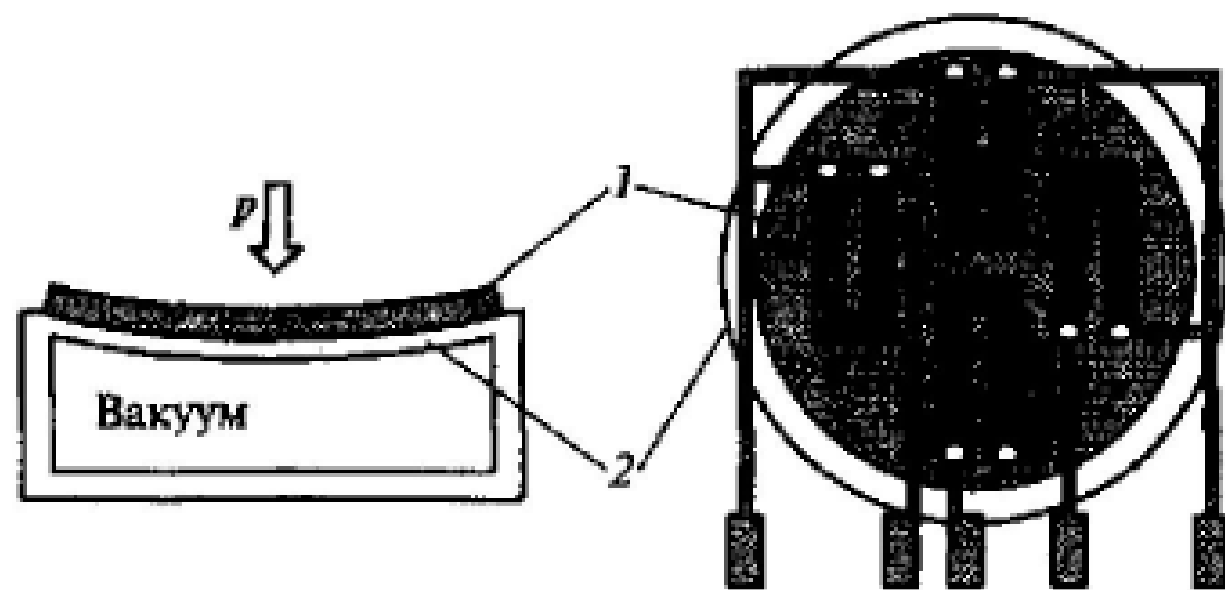


Рис. 8.28. Устройство микроэлектронного резистивного датчика:

1 — кремниевая пластина; 2 — мембрана

На тонкой пластине кремния сформированы тензорезисторы (по тонко- или толсто- пленочной технологии) $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ и соединительные проводники. Пластина закреплена на упругой мембране и деформируется (прогибается) вместе с ней.

Сопротивление резисторов $R2$ и $R4$ при деформации значительно увеличивается (до 20...50 %), а сопротивление резисторов $R1$, $R3$ практически не меняется. Все резисторы образуют мостовую схему, выходное напряжение которой определяется деформацией и, следовательно, значением измеряемого давления p .

На рис. 8.29 схематично показаны варианты конструктивного исполнения мембранной коробки датчиков для измерения абсолютного, относительного и дифференциального давлений.

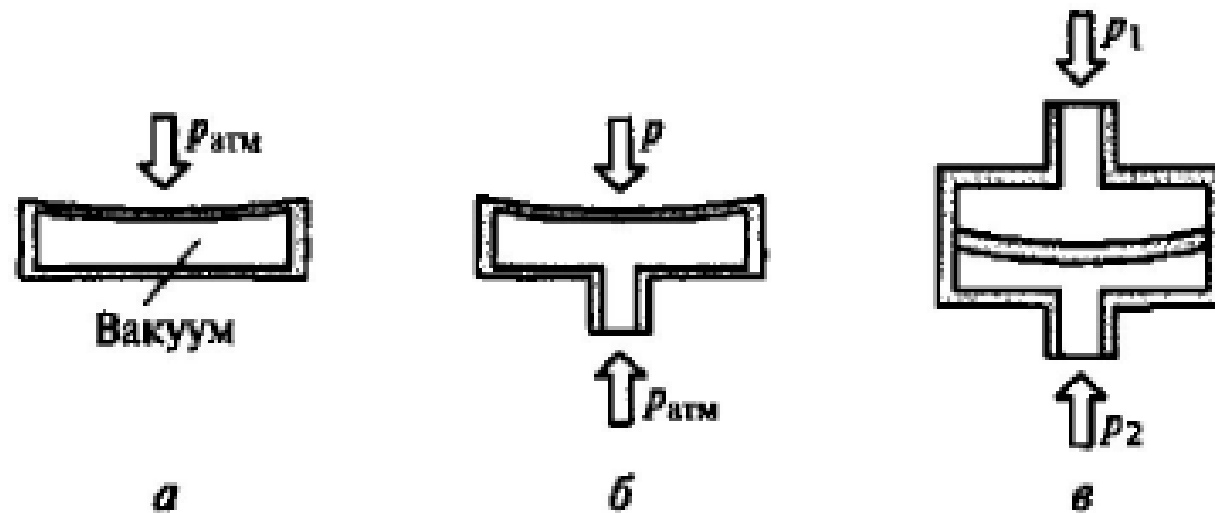


Рис. 8.29. Различные варианты конструкции мембранной коробки датчиков:

a — для измерения абсолютного давления (например, $p_{\text{атм}}$); *b* — для измерения относительного (дифференциального) давления как разности между атмосферным и измеряемым; *v* — для измерения дифференциального давления как разности между двумя измеряемыми давлениями p_1 и p_2

На рис. 8.29, а приведен вариант мембранной коробки для измерения абсолютного давления (например, атмосферного $p_{\text{атм}}$). Вариант на рис. 8.29, б предназначен для измерения относительного (дифференциального) давления как разности между атмосферным и измеряемым. Измерение дифференциального $p_{\text{диф}}$ как разности между двумя измеряемыми давлениями p_1 и p_2 иллюстрируется на рис. 8.29, в.

Существует понятие *трансммитера* (*Transmitter*), что означает такой полный преобразователь, который содержит и датчик, и цепи нормирования (кондиционирования) сигнала, т.е. выполняет и первичное, и вторичное преобразование входной величины — давления. На выходе трансмиттера — унифицированный сигнал: 0...100 мВ, или 0...10 В, или 4...20 мА, или иные, принятые стандартными, уровни. Погрешности преобразования (типичные) — 0.5...2.5 %.

Емкостные преобразователи. Помимо резистивных применяются и емкостные датчики давления. В емкостных датчиках мембрана выступает в роли одной из пластин конденсатора (рис. 8.30). Изменение ее положения приводит к изменению емкости датчика и затем, например, к изменению выходного напряжения моста переменного тока.

Благодаря достижениям микроэлектронной технологии габаритные размеры таких датчиков могут быть чрезвычайно малыми (единицы — десятки квадратных миллиметров). Кроме того, на кремниевой пластине могут размещаться и некоторые элементы вторичного преобразования, например, мостовые схемы, усилители.

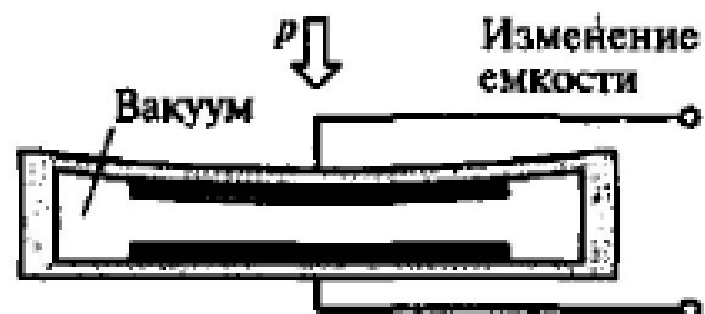


Рис. 8.30. Емкостной тензотрический датчик