

## 1.24. ДАТЧИКИ

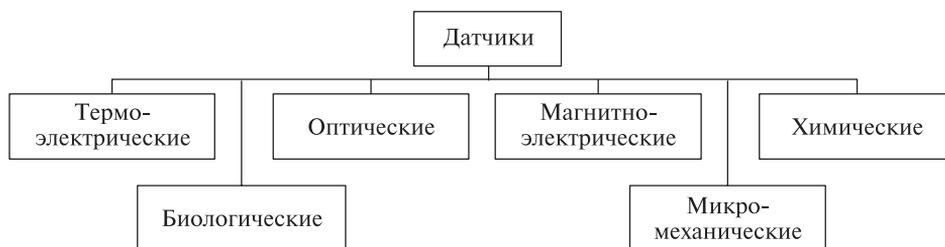
**Цель лекции:** ознакомление с принципами работы различных датчиков.

### 1.24.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Ранее в значении измерения физических величин использовался преимущественно русский термин «датчик». Иностранное слово «сенсор» вначале употреблялось только по отношению к устройствам, реагирующим на прикосновение человека («сенсорные устройства»: кнопки и клавиатура — *touchpad* и пр.) — в таком смысле в настоящее время верен именно этот вариант. Однако термин «сенсор» расширенно стали применять и в значении «датчик», поэтому будем считать, что сенсор и датчик в большинстве случаев одно и то же.

Датчик — устройство или элемент, принимающий и преобразующий измеряемое воздействие в электрический сигнал. Под измеряемым воздействием подразумевается не электрическая величина, а некоторая физическая, например, температура, давление или световой поток, а также действие различных по химическому составу веществ или биологических объектов.

На рис. 1.124 представлена классификация датчиков по природе физического эффекта.



**Рис. 1.124.** Классификация датчиков

Ниже приведены характеристики датчиков.

**Передающая функция** датчика показывает зависимость его выходного сигнала  $S$  от входного воздействия  $x$ . Эта зависимость может быть выражена в виде таблицы, графика или математического выражения  $S = f(x)$ .

Данная функция может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной или степенной).

**Диапазон измеряемых значений** — динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять. Эта величина показывает максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик преобразует в электрический сигнал, не выходя за пределы допустимых погрешностей.

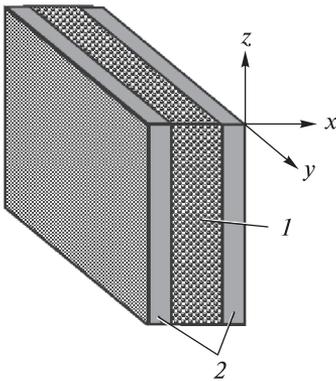
**Диапазон выходных значений** — разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии.

**Погрешность измерений** — величина максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков.

На точность датчиков влияют следующие характеристики: шумы, гистерезис, мертвая зона, параметры калибровки, повторяемость датчиков от партии к партии и воспроизводимость погрешностей.

### 1.24.2. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

В датчиках этого вида используется пьезоэлектрический эффект, который заключается в образовании зарядов в кристаллическом материале при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, таких как кварц  $\text{SiO}_2$ , в поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах. Слово «пьезо» происходит из греческого *piezen*, означающего давление.



**Рис. 1.125.** Схема пьезоэлектрического датчика:

1 — кристалл; 2 — электроды

На рис. 1.125 представлена схема пьезоэлектрического датчика. Кристалл кварца в виде параллелепипеда имеет с двух противоположных сторон металлические электроды. Когда кристалл сдавливается, на электродах появляется разность потенциалов  $U$ .

Пьезоэлектрические кристаллы являются прямыми преобразователями механической энергии в электрическую.

Значение заряда  $Q_x$ , генерируемого на поверхности пьезоэлектрического кристалла, пропорционально силе  $F_x$ , приложенной, например, в направлении оси  $x$ :

$$Q_x = K_0 F_x,$$

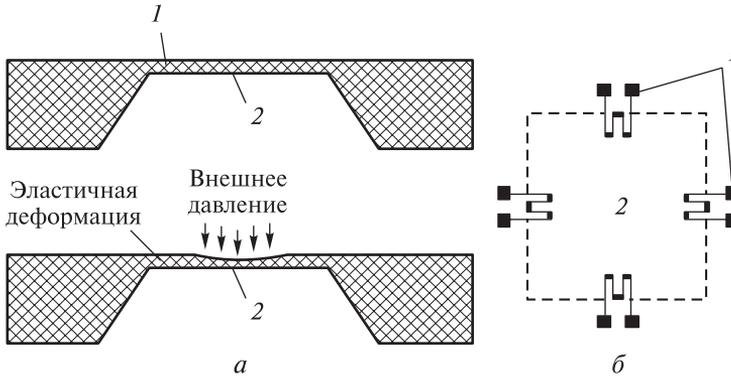
где  $K_0$  — пьезоэлектрическая постоянная.

Кристалл с нанесенным на него электродами представляет собой конденсатор, обладающий емкостью  $C$ , на котором напряжение определяется следующим выражением:

$$U = Q_x / C = K_0 F_x / C.$$

**Тензорезистивные датчики.** Действие тензорезистивных датчиков основано на изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации. Это явление называется тензорезистивным эффектом.

На рис. 1.126, *а* представлено сечение датчика, содержащего тонкую кремниевую мембрану, сформированную анизотропным травлением в нагретой щелочи КОН, на рис. 1.126, *б* — схема расположения тензорезистивных датчиков. При приложении давления тонкая диафрагма деформируется, изменяя электрическое сопротивление расположенного на ней поликремниевого резистора.



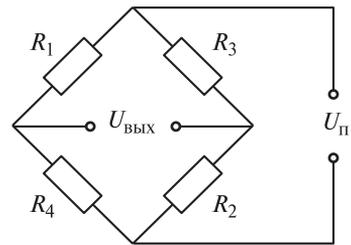
**Рис. 1.126.** Конструкция тензорезистивного датчика:  
1 — тензорезистор; 2 — тонкая диафрагма

Мостовая измерительная схема (рис. 1.127), используемая в датчиках давления, содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Между верхней и нижней точками моста подключается источник напряжения  $U_n$ . Между левой и правой точками измеряется выходной сигнал с помощью внешнего усилителя или чувствительного регистрирующего прибора.

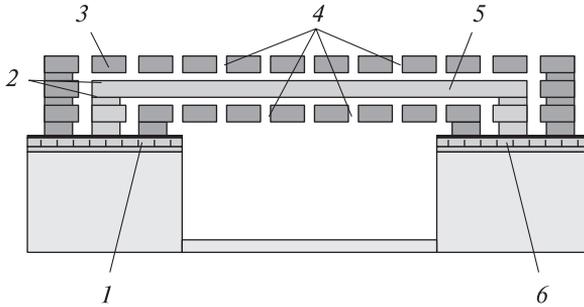
Преимущества использования мостовой схемы заключаются в исключении влияния внешнего источника напряжения на выходной сигнал и устранении значительной по величине постоянной составляющей за счет предварительной балансировки моста, что важно при измерении слабых сигналов.

**Акустические датчики.** К акустическим датчикам можно отнести микро-скопические микрофоны. Наиболее распространенными конструкциями микро-скопических микрофонов являются основанные на конденсаторном принципе (рис. 1.128).

Важных элементов в таком микрофоне всего два: гибкая обкладка — мембрана и более толстая, неподвижная обкладка. Под воздействием давления воздуха мембрана смещается, изменяется емкость между обкладками, при постоянном заряде изменяется напряжение. Эти данные пересчитываются в амплитуды и частоты звуковой волны.



**Рис. 1.127.** Мостовая схема тензорезистивного датчика давления



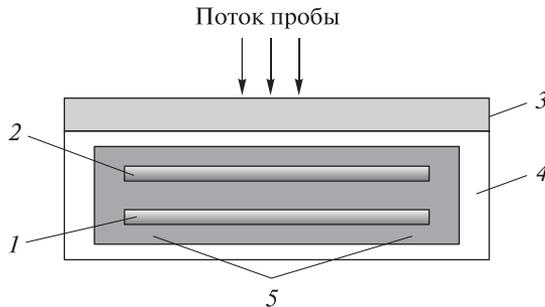
**Рис. 1.128.** Схема конденсаторного микрофона:

1 — верхняя неподвижная обкладка; 2 — отверстия в неподвижных обкладках; 3 — гибкая обкладка (диафрагма); 4 — зазоры; 5 — нижняя неподвижная обкладка; 6 — вентиляционное отверстие

**Электрохимические датчики.** Эти датчики являются самыми универсальными среди всех химических датчиков. В зависимости от принципа действия их подразделяют на датчики, измеряющие напряжение (потенциометрические) и измеряющие проводимость или сопротивление (кондуктометрические). В конструкции любого электрохимического датчика присутствуют как минимум два специальных электрода, между которыми протекает химическая реакция или происходит перемещение зарядов, образующихся в процессе этой реакции.

При проведении измерений электрическая цепь датчика замыкается через внешнюю измерительную цепь.

Принцип действия прибора (рис. 1.129) основан на явлении протекания специфической химической реакции (электрохимической реакции) в электрохимической ячейке, представляющей собой емкость с раствором электролита с электродами (анодом и катодом).

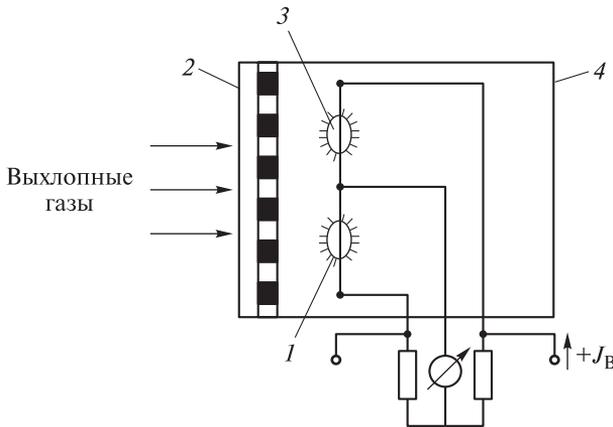


**Рис. 1.129.** Схема электрохимического датчика:

1 — считывающий электрод; 2 — рабочий электрод; 3 — тefлоновая мембрана; 4 — электронный блок; 5 — кислотный электролит

Поток пробы анализируемого вещества поступает в датчик через тефлоновую мембрану и вступает в химическую реакцию с электролитом, заполняющим ячейку. В результате в растворе возникают заряженные ионы, между электродами начинает протекать электрический ток, пропорциональный концентрации анализируемого компонента в пробе. Электронная схема обрабатывает возникающий электрический сигнал.

**Термокаталитические датчики.** На чувствительном элементе таких датчиков в результате протекания каталитических реакций происходит высвобождение тепла, а происходящее при этом изменение температуры внутри устройства регистрируется с помощью соответствующих детекторов температуры. Если одну из спиралей (рис. 1.130) покрыть слоем активного катализатора, а вторую — пассивным слоем, то находящийся в атмосфере монооксид углерода  $\text{CO}$  будет реагировать с кислородом воздуха на активном катализаторе, образуя диоксид углерода  $\text{CO}_2$ .



**Рис. 1.130.** Схема термокаталитического датчика:

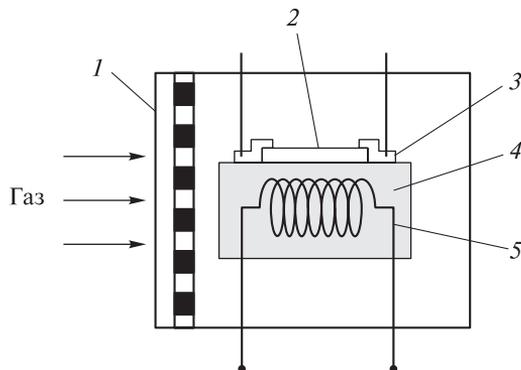
1 — активный катализатор; 2 — металлокерамика; 3 — пассивный катализатор; 4 — измерительная камера

Выделяющаяся в результате этой реакции тепловая энергия вызывает повышение сопротивления активной спирали и в результате заметную разбалансировку моста.

**Адсорбционные датчики.** В самых простых адсорбционных датчиках используется изменение электрического сопротивления некоторых материалов, возникающее вследствие адсорбции газа (рис. 1.131).

На керамическом корпусе находятся два электрода, между которыми наносит слой полупроводящего оксида металла. Если газ проходит над этим активированным слоем, то проводимость оксида металла изменяется. С помощью мостовой схемы изменение проводимости преобразуется в изменение напряжения.

Чувствительные элементы адсорбционного датчика для различных анализируемых веществ:

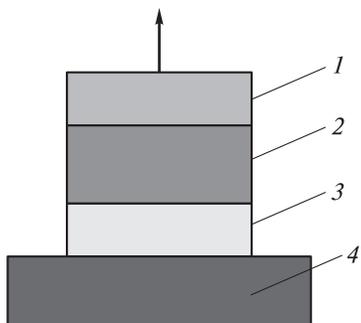


**Рис. 1.131.** Схема адсорбционного датчика:  
1 — металлокерамика; 2 — оксид металла; 3 — электроды; 4 — керамический корпус; 5 — нагреватель

- оксид углерода  $\text{CO}$  — слой  $\text{SnO}_2$  при рабочей температуре 250...500 °С;
- водород  $\text{H}_2$  — слой  $\text{SnO}_2$  с добавкой 1 %  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ;
- этанол  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  — слой  $\text{SnO}_2$  на кварцевых подложках;
- сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  — слой  $\text{SnO}_2$  с добавкой алюминия;
- изобутан  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  — слой легированного  $\text{ZnO}$  на подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и слой катализатора из соединения платины.

**Биологические датчики.** Эти датчики являются особым видом химических датчиков. Эволюция развития живых существ привела к созданию очень чувствительных органов, реагирующих на присутствие в воздухе даже нескольких молекул определенных веществ. Датчики на основе биологически активных материалов не обладают такой высокой чувствительностью, но в комбинации с другими детекторами (например, амперметрическими или тепловыми) могут качественно и количественно определять ряд биологических компонентов, таких как простейшие организмы, клетки, ткани, органеллы, мембраны, ферменты, рецепторы, антитела и нуклеиновые кислоты.

Энзимные датчики, являющиеся одной из разновидностей биобиодатчиков (рис. 1.132), обладают высокой избирательной способностью. В качестве чувствительного элемента может использоваться либо тепловой, либо электрохимический, либо оптический детектор. Энзимы действуют только в водной среде, поэтому их, как правило, размещают в гидрогеле. Принцип действия таких детекторов заключается в том, что ферменты (катализаторы), удерживаемые в специальном слое, вступают в реак-



**Рис. 1.132.** Схема энзимного биодатчика (стрелка показывает выход электрического сигнала на регистрирующую аппаратуру):

- 1 — чувствительный элемент; 2 — энзимный слой; 3 — буферный слой; 4 — исследуемый образец

цию с элементами подложки, проникающими в этот слой за счет процессов диффузии.

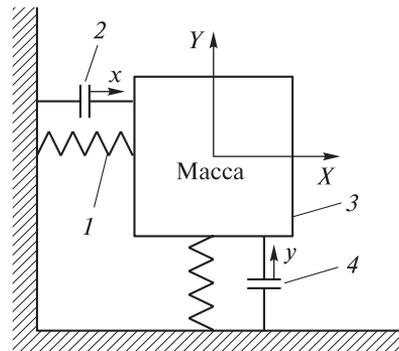
**Термоэлектрические датчики.** Принцип работы этой группы датчиков основан на рассмотренном ранее эффекте Зеебека и заключается в том, что в замкнутых контурах проводников или полупроводников возникает электрический ток, если места спайки различаются по температуре. Для измерения температуры один конец термопары помещают в среду измерения, а другой служит для снятия значений.

**Терморезистивные датчики.** Как следует из названия, этот тип датчиков работает по принципу изменения сопротивления проводника при изменении его температуры. Благодаря простой и надежной конструкции датчики этого типа широко применяются в электронике и машиностроении. Достоинством этих измерителей является высокая точность, чувствительность и простые устройства считывания.

**Полупроводниковые термодатчики.** Этот тип датчиков работает на принципе изменения характеристик  $p-n$ -перехода под воздействием температуры. Так как зависимость напряжения на транзисторе от температуры всегда пропорциональна, можно сделать датчик с высокой точностью измерения. Несомненными плюсами такого решения являются дешевизна, высокая точность данных и линейность характеристик на всем диапазоне измерения. Кроме того, их можно монтировать прямо на полупроводниковой подложке, что делает этот тип датчиков незаменимым для микроэлектронной промышленности.

**Оптический датчик.** Это оптическое электронное устройство, в котором используются рассмотренные ранее различные типы детектора оптического излучения, например, фотодиод, фоторезистор, фототранзистор и т. п. Диапазон длин волн, в котором используются такие датчики, от инфракрасного до ультрафиолетового. Принимаемый датчиком оптический сигнал преобразуется в электрический. Для работы датчика необходимо наличие излучателя, излучение от которого должно быть направлено на датчик. Датчик регистрирует изменение интенсивности излучения.

**Микроакселерометры (датчики ускорения).** Датчики ускорения относятся к инерциальным датчикам. В зависимости от способов съема информации они бывают оптическими, емкостными, тензочувствительными и другими датчиками. Обычно датчики ускорения (скорости) имеют сравнительно сложную пространственную структуру, содержащую инерционную массу, элементы ее подвеса, датчики смещения массы, другие элементы. Рассмотрим принцип работы конденсаторных акселерометров (рис. 1.133). Инерционная масса подвешена к корпусу акселерометра на двух пружинных подвесах.



**Рис. 1.133.** Схема акселерометра:  
1 — подвесы; 2 — конденсатор по оси  $x$ ;  
3 — масса; 4 — конденсатор по оси  $y$

Между массой и корпусом установлены по двум осям конденсаторы, расстояние между обкладками которых может изменяться при перемещении массы.

В состоянии покоя расстояния между обкладками конденсатора не меняются и, следовательно, емкость конденсаторов также не меняется. При воздействии силы на корпус акселерометра эти расстояния меняются, что в дальнейшем фиксируется специальной аналоговой измерительной системой.

## Тесты к лекции 1.24

### 1. Что такое датчик?

- а) устройство или элемент, принимающий и преобразующий измеряемое воздействие в электрический сигнал;
- б) устройство или элемент, усиливающий сигнал, принятый детектором;
- в) устройство или элемент, излучающий световой поток при воздействии на него.

### 2. Какие из перечисленных величин могут быть зафиксированы датчиком?

- а) температура, давление;
- б) напряжение, ток;
- в) емкость, индуктивность.

### 3. Что показывает передаточная функция датчика?

- а) зависимость его выходного сигнала от входного воздействия;
- б) зависимость входного сигнала от выходного воздействия;
- в) зависимость его выходного сигнала от напряжения питания.

### 4. Что такое диапазон измеряемых датчиком значений?

- а) динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять;
- б) диапазон выходных значений, который датчик может выдать;
- в) диапазон напряжений питания, в котором датчик может работать.

### 5. Какой вид воздействия пьезоэлектрический датчик преобразует в электрический сигнал?

- а) механический;
- б) химический;
- в) оптический.

### 6. Какой вид воздействия тензоэлектрический датчик преобразует в электрический сигнал?

- а) механический;
- б) радиационный;
- в) биохимический.

### 7. На каком принципе работают полупроводниковые термодатчики?

- а) на принципе изменения характеристик  $p-n$ -перехода под воздействием температуры;
- б) на принципе изменения ширины запрещенной зоны под воздействием температуры;
- в) на принципе изменения степени легирования под воздействием температуры.