

Лекция № 9.

Первичные преобразователи систем измерения физических величин

Эффективное управление сложными техническими объектами (атомные электростанции, объекты топливно-энергетического комплекса и пр.), автоматизация технологических процессов, дальнейшее развитие научных исследований требуют массовых измерений разнообразных физических величин. Так, на современном блоке АЭС имеется свыше 3000 точек контроля различных величин, прежде всего температуры, давления, расхода.

Принято разделять методы и средства измерения электрических и неэлектрических величин. Однако большинство неэлектрических величин измеряют электрическими методами путем преобразования неэлектрической величины в электрический сигнал, поскольку обработка, передача и отображение сигналов в электрической области сравнительно просты. Восприятие физической величины и преобразование ее в электрический сигнал в измерительных системах осуществляется первичными измерительными преобразователями (ПИП) или измерительными датчиками. Датчики содержат *чувствительный элемент*, преобразующий измеряемую физическую величину в другую величину, пригодную для дальнейшей обработки и преобразования. Ограничим наше рассмотрение датчиками, которые отображают величины из различных физических областей в сигналы в электрической области. Единой классификации датчиков, основанных на различных физических принципах и явлениях, не существует. Однако все датчики принято делить на два класса: генераторные и параметрические.

В генераторных преобразователях выходной сигнал в виде ЭДС, заряда или тока возникает в результате физических эффектов, функционально связанных с измеряемой неэлектрической величиной. Применение этих преобразователей не требует внешних источников питания. К генераторным преобразователям относят пьезоэлектрические датчики, индукционные преобразователи, термоэлектрические преобразователи (термопары) и др.

В параметрических преобразователях собственно выходной величиной при воздействии входной является изменение параметров датчика: его сопротивления, емкости, индуктивности. Поэтому при их использовании необходим дополнительный источник питания, позволяющий трансформировать изменение параметров датчика в изменение тока, напряжения или заряда. Для работы с такими датчиками используют измерительные цепи, питаемые как постоянным, так и переменным током. К параметрическим преобразователям относят: индуктивные преобразователи, емкостные преобразователи, тензорезисторы, терморезисторы и т. д.

Классификацию датчиков часто осуществляют по той физической величине, которая измеряется с их помощью, например, датчики малых перемещений, датчики температур, акселерометры. С другой стороны, датчики разумно классифицировать по физическим принципам, заложенным в их основу. Рассмотрим разновидности широко применяемых датчиков.

Резистивные измерительные преобразователи относятся к классу параметрических датчиков, включаемых в электрическую цепь с источником питания. Общим свойством является зависимость сопротивления датчика от измеряемой величины.

Реостатный преобразователь – прецизионный реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой величины. Входной величиной датчика является линейное или угловое перемещение движка, выходной – изменение его сопротивления. Обмотка реостата изготавливается из провода с высоким удельным сопротивлением: константана, манганина, нихрома. Достоинство датчика заключается в его простоте, а недостаток – в механическом износе и химической коррозии, которые способны изменить рабочую характеристику датчика. Легко показать, что реостатный преобразователь перемещений имеет линейную функцию преобразования $u_n = f(x) = \frac{U_{ном}}{l} x$ только при условии $R_{нагр} \gg R_{реост}$, в противном случае появляется нелинейность.

Тензорезисторный преобразователь (тензорезистор) – проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации растяжения–сжатия за счет тензоэффекта. Функцией преобразования тензорезистора является зависимость его относительного сопротивления от деформации: $\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon)$. Различают металлические (проволочные, фольговые, пленочные) и полупроводниковые тензорезисторы. Полупроводниковые тензорезисторы имеют на два порядка большую чувствительность по сравнению с металлическими, но и сама чувствительность, и их сопротивление сильно зависят от температуры. Тензорезисторы применяют для измерений деформаций объекта контроля, для этого их наклеивают на объект контроля, чтобы они испытывали одинаковые с ним деформации.

Терморезисторные преобразователи (терморезисторы) – датчики, активное сопротивление которых меняется с изменением температуры, поэтому их называют *термометры сопротивления*. В качестве терморезистора используют металлические или полупроводниковые резисторы. Последние также называют *термисторами*. Для изготовления металлических терморезисторов обычно используют медь или платину. Функция преобразования медного терморезистора линейна: $R_T = R_0(1 + \alpha T)$, где R_0 – сопротивление датчика при $T = 0$ °С, α – температурный коэффициент сопротивления

(ТКС). Функция преобразования платинового терморезистора нелинейна и обычно аппроксимируется квадратичным трехчленом: $R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$. Коэффициенты зависимости равны: $\alpha = 3,91 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, $\beta = 5,78 \cdot 10^{-7} K^{-2}$. Термометры сопротивлений обычно включают последовательно со вторичным прибором, часто с использованием компенсационных схем. В менее ответственных случаях для измерения сопротивлений используют мостовые схемы: в лабораторной практике – с ручным уравниванием, в производственных условиях – автоматические.

Полупроводниковые терморезисторы – термисторы изготавливают из окислов различных металлов: меди, кобальта, магния, марганца, с номинальным сопротивлением от 1 до 200 кОм. В зависимости от типа они применяются для измерения температур от -100 до 600 °С. Их чувствительность в 6–10 раз больше чувствительности металлических терморезисторов. Недостатком термисторов является нелинейность функции преобразования, обычно описываемой выражением:

$$R_T = A e^{B/T}, \quad (9.1)$$

где R_T – сопротивление термистора при температуре T в кельвинах; A, B – постоянные, зависящие от материала и технологии. Термисторы обычно включаются в схему неравновесного или автоматического моста.

Фоторезисторные преобразователи (фоторезисторы) – датчики, относящиеся к классу фотоэлектронных (оптоэлектронных) приемников. Принцип их работы основан на внутреннем фотоэффекте – явлении образования свободных электронов и дырок в полупроводнике при поглощении квантов света и резком возрастании его фотопроводимости. Фоторезистор представляет собой пластинку, на которую нанесен слой полупроводникового фоточувствительного материала (обычно из сернистого кадмия, селенистого кадмия или сернистого свинца). Одной из основных характеристик фоторезисторов является фоточувствительность: токовая чувствительность к световому потоку: $S_I = dI/dP$, определяемая отношением изменения фототока к вызвавшему это изменение лучистому потоку. Эта чувствительность зависит не только от свойств фотоприемника, но и от схемы, в которую он включен. Чувствительность фоторезисторов может определяться кратностью изменения их сопротивления:

$$k = \frac{R_T}{R_{200}}, \quad \text{где } R_T \text{ – темновое сопротивление неосвещенного преобразователя (обычно } R_T = 10^3 - 10^7 \text{ Ом), } R_{200} \text{ – сопротивление при освещенности } E = 200 \text{ лк.}$$

У некоторых типов фоторезисторов k достигает значений до 10^5 . В целом фоторезисторы характеризуются высокой чувствительностью, большим спектральным диапазоном,

возможностью использования в инфракрасной области спектра. К их недостаткам относят значительную инерционность: постоянная времени сернисто-кадмиевых датчиков лежит в пределах 1–140 мс, селенисто-кадмиевых – 0.5–20 мс. Отсюда сравнительно низкая граничная частота их использования – 10^3 – 10^4 Гц. Кроме того, сопротивление фоторезисторов зависит от температуры подобно сопротивлению термисторов, поэтому с целью уменьшения температурной погрешности их включают в смежные плечи моста.

Магниторезистивные преобразователи (магниторезисторы) относятся к классу гальваномагнитных преобразователей, изменение сопротивления которых обусловлено изменением подвижности носителей зарядов в полупроводниках под действием магнитного поля. При воздействии магнитного поля с индукцией B скорость движения носителей зарядов в направлении поля уменьшается. Функция преобразования магниторезистора, описывающая зависимость его сопротивления от индукции, имеет вид:

$$R_B = R_0 \left[1 + A |\mu B|^m \right], \quad (9.2)$$

где A – магниторезистивный коэффициент, зависящий от свойств материала и формы преобразователя, μ – подвижность носителей заряда, m – показатель степени, равный 2 в слабых магнитных полях ($B \leq 0,2$ – $0,5$ Тл), и равный 1 в сильных магнитных полях.

Электромагнитные измерительные преобразователи представляют собой один или несколько контуров (катушек) индуктивности, находящихся в магнитном поле, которое может быть создано как токами, протекающими в самих контурах, так и внешним источником. В соответствии с принципом действия и исходными уравнениями электромагнитные преобразователи могут быть разделены на следующие группы:

1. *Электромеханические преобразователи* (электромагнитные преобразователи измерительных механизмов электромеханических приборов). Они используются в электромеханических приборах: амперметрах, вольтметрах, ваттметрах, фазометрах, частотомерах и в качестве обратных преобразователей датчиков уравновешивающего преобразования. Входной величиной электромеханических преобразователей является ток, а выходной – перемещение указателя отсчетного устройства.
2. *Индукционные преобразователи*, основанные на законе электромагнитной индукции и используемые для определения линейных скоростей, угловых скоростей, параметров вращения элементов механизмов и устройств, а также измерения параметров постоянных и переменных магнитных полей.
3. *Индуктивные и взаимоиндуктивные (трансформаторные) преобразователи* для измерения широкого класса физических величин, влияющих на изменение

взаимного положения отдельных частей преобразователя: деформаций, перемещений, усилий, давлений и пр.

4. *Вихретоковые преобразователи*, принцип действия которых основан на возбуждении в электропроводящем объекте контроля вихревых токов и регистрации параметров суммарного магнитного поля, зависящих от размеров исследуемого объекта, его электропроводности и магнитных свойств.
5. *Магнитоупругие преобразователи*, в которых используется зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от механических напряжений в материале. Применяются для измерения сил и давлений.
6. *Магнитомодуляционные преобразователи*, в которых используются нелинейные свойства магнитной цепи: зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного материала от напряженности магнитного поля. Используются для измерения перемещений объектов и измерения напряженности постоянного магнитного поля.
7. *Магнитошумовые преобразователи*, использующие эффект Баркгаузена. Выходной величиной этих преобразователей является ЭДС магнитного шума, индуцируемая в измерительной катушке. Возможно определение механических напряжений в объекте контроля и толщины покрытий.

Емкостные измерительные преобразователи. Представляют собой конденсаторы с плоскими или цилиндрическими электродами, включенные, как правило, в резонансную измерительную цепь, электрические параметры которой меняются под действием входной величины. Служат прежде всего для измерений малых перемещений и других величин, связанных с перемещениями: усилий, давлений, вибраций. Известны применения этих датчиков для определения уровня жидкости, толщины лент из диэлектрика, углов поворота вала и т.п. Емкостные преобразователи обладают высокой чувствительностью, широкополосностью и низким уровнем собственных шумов, что позволяет оценить предельный порог чувствительности значениями порядка 10^{-14} м.

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в арсенале акустических, в частности ультразвуковых, методов исследования и контроля материалов и узлов оборудования ядерно-энергетических установок. Они используются как для возбуждения в объекте контроля упругих колебаний и волн, так и для их регистрации. Прямой пьезоэффект используют для регистрации упругих колебаний и волн, а обратный – для их генерации. Режим измерений, при котором в объекте контроля намеренно возбуждают ультразвуковые колебания и волны с целью упрощения задачи определения его физических свойств, называют *активным*. В отличие от активного

метода *пассивным* называют такой, при котором специальные средства возбуждения колебаний отсутствуют. Типичный пример – регистрация упругих колебаний и волн, возникающих в объекте при воздействии температур, агрессивных сред, статических механических нагрузок, что получило название акустической эмиссии (АЭ). Преимущества пьезопреобразователей: высокая эффективность преобразования энергии и конструктивная простота – обусловили их широкое применение в системах ультразвукового контроля, дефектоскопии и технической диагностики, используемых в реакторной технике.

Характеристики и конструктивные особенности использования пьезоэлектрических, емкостных, некоторых разновидностей резистивных и электромагнитных преобразователей в измерительных системах будут рассмотрены в последующих лекциях. Здесь же упомянем о некоторых классах датчиков, принципы работы и конструктивные особенности которых будут излагаться в дальнейшем в других учебных курсах:

- датчики для измерения тепловых величин: термоэлектрические преобразователи (термопары), пирозэлектрические преобразователи (пирометры);
- ионизационные преобразователи: ионизационные камеры, сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы и пр.;
- фотоэлектрические преобразователи: фотодиоды, фотоэлементы, фотоэлектронные умножители;
- электрохимические преобразователи: кондуктометрические, гальванические, кулонометрические преобразователи.