

1. Измерения физических величин

“Наука начинается с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры”

Д.И. Менделеев

Одним из направлений научно-технического прогресса является совершенствование уже существующих и создание новых средств измерений, в частности измерительных преобразователей. Дальнейшее развитие исследований в различных областях науки, в частности медицине и биологии, изучение живых организмов, борьба с болезнями, охрана окружающей среды и здоровья человека, при которых условия измерений становятся все более сложными, обуславливают необходимость создания принципиально новых средств измерений, в первую очередь измерительных первичных преобразователей.

Существует большое разнообразие измерительных преобразователей по принципу действия и конструктивному исполнению. Повышаются требования к их точности, чувствительности, быстродействию. Точность многих средств измерений зачастую определяется точностью именно первичных преобразователей, поскольку вторичные средства измерений достаточно совершенны.

Предметом курса “Измерительные преобразователи и электроды” является изучение физических основ измерительного преобразования, преобразователей с различными физическими закономерностями,ложенными в основу принципа действия, а также вопросов расчета и установления зависимостей между метрологическими характеристиками и конструктивными параметрами преобразователей для определения оптимальных параметров последних.

Физические и физико-химические явления, протекающие в человеческом организме, характеризуются различными свойствами, состояниями и процессами (температурой, давлением, электропроводностью и др.). Для полного определения свойств организма и его состояния в целом необходимо проводить комплекс медико-биологических исследований, осуществляемый посредством измерения различных физиологических величин. Далее физиологическая величина интерпретируется в какой-либо фактор, характеризующий тот или иной процесс.

Количественная информация о свойствах физических объектов, получаемая в результате измерений - измерительная информация.

Измерение - экспериментальное выражение значения физиологической величины с помощью специальных технических средств с нормированными метрологическими характеристиками.

Цель измерений - установление истинного значения физиологической величины в стандартных единицах измерения.

Истинное значение - такое экспериментальное значение, которое так близко к абсолютному, что может его заменить с точностью до погрешности измерений.

Результат измерения - сигнал на выходе системы, несущий информацию в виде значения измеряемой физической величины.

Измеряемая величина - подлежащая измерению физиологическая величина.

Входной измерительный сигнал - определенный параметр, несущий информацию о значении измеряемой величины. *Информативным параметром* входного сигнала называется тот параметр процесса, который является изменяемым или функционально связан с измеряемой величиной. *Неинформационным параметром* называется параметр входного сигнала, который функционально не связан с измеряемой величиной. Такой параметр, однако, может оказывать воздействие на измерительное средство и быть источником погрешностей.

2. Средства измерений

Средства измерений - технические средства с нормированными метрологическими характеристиками.

Измерительный прибор - средство измерения, предназначенное для преобразования измерительного сигнала в форму, позволяющую наблюдателю воспринимать значение измеряемой величины.

Измерительное преобразование - преобразование входного измерительного сигнала в функционально связанный с ним выходной сигнал.

Измерительный преобразователь (ИП) - средство измерения, предназначенное для выработки информативного измерительного сигнала в форме удобной для передачи, преобразования, обработки, хранения, но не для непосредственного восприятия. Это техническое устройство, построенное на определенных физических принципах и выполняющее одно частное измерительное преобразование. Обычно незлектрическая физиологическая или физическая величина преобразуется в электрическую или наоборот. Среди количественных характеристик состояния пациента есть имеющие электрическую природу (биологическое электричество в процессах клеточного и межклеточного обмена) и не имеющие электрической природы, а именно

- акустические (тоны сердца, шумы легких);

- механические (смещение сердца, сокращение мышц, скорость движения перегородок сердца);
- термические (температура) и др.

В общем случае ИП может состоять из нескольких преобразовательных элементов, в каждом из которых происходит одно из последовательных преобразований измерительного сигнала. Совокупность преобразовательных элементов составляет измерительную цепь средства измерений. Часть первого в цепи преобразовательного элемента, на которую непосредственно воздействует измеряемая величина, называется чувствительным элементом. ИП (преобразовательный элемент), являющийся первым в цепи последовательно соединенных преобразователей, называется первичным.

Наряду с термином “измерительный преобразователь” широкое распространение получил термин “датчик”.

Датчик прибора для измерения требуемой величины - конструктивно завершенное устройство, размещаемое в процессе измерения непосредственно в зоне исследуемого объекта и выполняющее функцию измерительного преобразователя.

Датчик преобразует один вид энергии в другой. В медицине в большинстве случаев неэлектрические величины (перемещение, скорость, давление, температура и др.) преобразуются в электрические, которые удобны для дальнейшей обработки.

5. Метрологические характеристики измерительных преобразователей

5.1. Характеристики ИП в статическом режиме

Статические характеристики описывают свойства преобразователя при работе в лабораторных условиях с малыми изменениями измеряемой величины. Эти характеристики называются градуировочными. Условия измерений - температура 25°C, влажность < 90%, нормальной давление 100 кПа.

Основной характеристикой ИП является *функция преобразования* $Y=f(X)$, определяющая зависимость выходной величины Y от входной X , которые представляют собой истинные (при теоретическом анализе) и действительные (при экспериментальных исследованиях) значения величин. Чаще всего эта зависимость описывается аналитическим выражением, иногда графически или задается в виде таблицы. В качестве обобщенной характеристики ИП данного типа принимается некоторая усредненная функция преобразования большой группы однотипных преобразователей.

Отношение выходной величины Y ко входной X называется *коэффициентом преобразования* $k(X) = Y/X$ - в общем случае - функция входной преобразуемой величины.

Производная от функции преобразования $S = dY/dX = F'(X)$ называется *чувствительностью* ИП. Чувствительность характеризует степень реагирования ИП на входную величину. Для преобразователей функция преобразования которых линейна, чувствительность будет постоянной. Если же функция преобразования нелинейна, то чувствительность является функцией входной величины и связана с коэффициентом преобразования зависимостью

$$S(X) = \frac{dY}{dX} = \frac{d[k(X)X]}{dX} = k(X) + \frac{dk(X)}{dX} X. \quad (1)$$

Для характеристики нелинейных ИП используют понятие *средней чувствительности* в диапазоне преобразований

$$S_{\text{ср}} = \frac{Y_e - Y_i}{X_e - X_i}, \quad (2)$$

где Y_k - Y_n и X_k - X_n - диапазоны преобразований соответственно по выходной и входной величинам; Y_i , Y_e , X_k , X_n - конечный и начальный пределы преобразований.

Под *относительной чувствительностью* ИП понимают отношение относительного изменения выходной величины к относительному изменению входной:

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}. \quad (3)$$

Следует отметить, что изменение выходного сигнала ИП может быть обусловлено также влиянием неинформативного параметра входного сигнала. Поэтому говорят о чувствительности ИП к неинформативным параметрам. В общем случае полное приращение выходного сигнала с учетом влияющих неинформативных параметров

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial X} dX + \frac{\partial Y}{\partial a} da + \frac{\partial Y}{\partial b} db + \dots + \frac{\partial Y}{\partial m} dm + \dots \quad (4)$$

Здесь $S_a = \frac{\partial Y}{\partial a}$, $S_b = \frac{\partial Y}{\partial b}$, ..., $S_m = \frac{\partial Y}{\partial m}$ - чувствительность ИП к соответствующим неинформативным параметрам a, b, \dots, m, \dots

Номинальными характеристиками называют действительные, полученные в результате эксперимента. Они учитывают все параметры (факторы), влияющие на результат эксперимента.

Диапазон измерений - область значений измеряемой величины, в пределах которой нормированы погрешности средства измерений.

Точность измерений - характеризует близость измеренного значения физической величины к действительному. Количественное выражение точности - *погрешность*. Погрешности могут быть классифицированы по различным признакам: способу выражения (абсолютные, относительные и приведенные), условиям возникновения (основные и дополнительные), степени неопределенности (систематические и случайные) и др.

Наибольшая точность, с которой осуществляются измерения - *разрешающая способность*. Обобщенная характеристика, определяющая пределы допустимых погрешностей - *класс точности*.

5.2. Характеристики ИП в динамическом режиме

Динамическими называют такие характеристики ИП, которые проявляются лишь при работе преобразователя в динамическом режиме, т. е. при преобразованиях переменных во времени величин. Динамические характеристики описывают свойства измерительного преобразователя при быстрых изменениях измеряемой величины. Графическая регистрация быстро протекающих физических процессов характеризуется динамической характеристикой (ЭЭГ, ЭКГ, МГ и др.).

Основной характеристикой, описывающей работу преобразователя в динамическом режиме, является дифференциальное уравнение, связывающее выходную величину $Y(t)$ с входной $X(t)$:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) Y(t) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0) X(t) \quad (5)$$

где p - оператор дифференцирования.

Удобной для анализа формой представления дифференциального уравнения является операторная форма в виде изображения по Лапласу:

$$L[X(t)] = X(s); L[Y(t)] = Y(s) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0) Y(s) - G_Y(s) = \\ = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0) X(s) - G_X(s), \end{aligned}$$

где $G_Y(s)$, $G_X(s)$ - остаточные члены, обусловленные ненулевыми начальными условиями. Решая уравнение относительно изображения выходной величины, получим

$$Y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} X(s) + \frac{G_Y(s) - G_X(s)}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}. \quad (7)$$

Первый член (7) представляет собой изображение $Y_n(s)$ выходного сигнала $Y_n(t)$ при нулевых начальных условиях, а второй член характеризует влияние ненулевых начальных условий.

Отношение изображения $Y_n(s)$ выходной величины к изображению $X(s)$ входной величины называется *передаточной функцией ИП*:

$$\frac{Y_i(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} = W(s). \quad (8)$$

В статическом режиме, т. е. при $X(t)=const$, $Y(t)=const$ (или $s \rightarrow 0$), передаточная функция примет вид

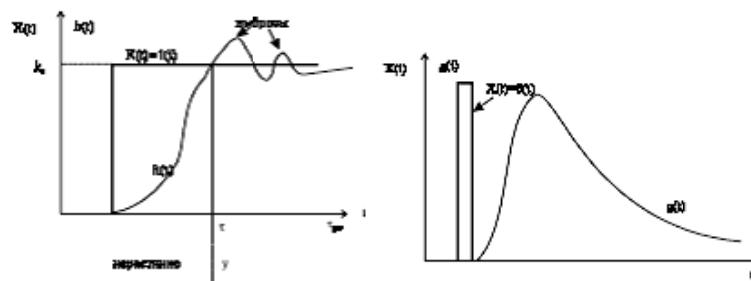
$$W_{s \rightarrow 0} = \frac{b_0}{a_0} = k_0, \quad (9)$$

где k_0 - статический коэффициент преобразования.

Передаточная функция $W(s)$ - исчерпывающая характеристика динамических свойств ИП. Однако, она малонаглядна и трудно поддается экспериментальному определению. На практике используют реакцию $Y(t)$ ИП на типовые входные сигналы и начальные условия: воздействие в виде единичного скачка или короткого импульса; и линейно нарастающее или синусоидальное воздействие.

Реакция ИП с нулевыми начальными условиями на воздействие в виде единичного скачка $1(t)$ называется *переходной функцией* $h(t)$. Скорость приближения переходной функции к установившемуся значению $h(\infty) = k_0$ является мерой инерционности ИП.

Реакция преобразователя на воздействие в виде короткого импульса единичной площади $X(t)=\delta(t)$ называется *импульсной переходной функцией*, или *функцией веса* $g(t)$.



Между переходной функцией и функцией веса существует зависимость

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}; h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (10)$$

Переходная и весовая функции могут быть применены для определения реакции ИП на любое реальное воздействие $X(t)$ сложной формы, представляемое в виде последовательности примыкающих друг к другу элементарных воздействий.

Установившаяся реакция на синусоидальное входное воздействие в общем случае является сложной функцией параметров преобразователя и описывается соответствующими амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками.

В зависимости от порядка дифференциального уравнения, описывающего ИП, различают ИП первого, второго и высшего порядков. ИП первого порядка (безынерционные, интегрирующие и дифференцирующие) характеризуются апериодическим характером переходного процесса (тепловые, химические ИП). В электрических, механических, акустических ИП, кроме апериодического, наблюдается колебательный характер переходного процесса.

Погрешностью преобразователя в динамическом режиме называют погрешность, присущую ему при преобразовании переменных во времени величин. *Динамической погрешностью* считают разность между погрешностью в динамическом режиме и его статической погрешностью. Динамические погрешности обусловлены инерционными свойствами преобразователя и поэтому их значения зависят от скорости изменения преобразуемой величины. При анализе динамических погрешностей обычно пренебрегают статическими погрешностями, а динамические считают равными суммарной погрешности преобразователя в динамическом режиме.

Параметрами, характеризующими динамические свойства ИП, являются время преобразования t_n и граничная частота преобразования ω_{sp} .

Временем преобразования t_n называется такое время, по истечении которого динамическая погрешность становится равной допустимой. *Граничная частота преобразования* ω_{sp} . - такая частота сигнала, при которой динамическая погрешность становится равной допустимой.

Динамический диапазон - область входных величин, преобразуемая ИП без заметных искажений.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРОВ

1. Классификация медицинских ИП по различным признакам

1.1. По назначению

- медицинские ИП (диагностика и лечение человека);
- ИП для физиологических экспериментов;
- ИП для определения состояния оператора;
- ИП для исследования биологических объектов;
- ИП для управления биологическим объектом.

1.2. По характеру применения

- внутриполостные ИП;
- вживляемые ИП (имплантруемые);
- поверхностные (на коже);
- наружные (выносные) ИП;
- постоянно-действующие;
- контрольные и сигнализирующие;
- ИП для исследований в специальных условиях;
- лабораторные и образцовые ИП (для калибровки).

1.3. По степени точности

- по классам точности;
- в соответствии с требованиями для решения конкретных задач.

1.4. По связи чувствительного элемента ИП с объектом измерения

- контактные;
- бесконтактные.

1.5. По принципу преобразования измеренного параметра в электрический сигнал

- генераторные (активные);
- параметрические (пассивные);
- ИП с косвенным преобразованием измеряемого параметра в электрический сигнал через колебания другого вида.

Активные преобразователи преобразуют неэлектрическую энергию непосредственно в электрическую (термоэлементы, фотоэлементы и др.).

Для действия пассивных преобразователей требуется вспомогательная энергия: сам преобразователь не использует внешнюю энергию, а под действием неэлектрической энергии только изменяет величину вспомогательной энергии (например, термистор). Существуют пассивные преобразователи, которые фиксируют изменение постоянной внешней энергии, вводимой в биологический объект (БО), в зависимости от этого показателя (фотоэлектрический преобразователь на кончике пальца пациента дает электрический сигнал пропорциональный интенсивности света из-за пульсации сосудов, тканей). При использовании пассивных преобразователей всегда необходима постоянная внешняя энергия. Изучение изменений этой энергии в зависимости от исследуемого показателя позволяет оценить последний. Эти преобразователи называют “опросными пассивными”.

1.6. По физическим явлениям, положенным в основу преобразования энергии датчиком

- ИП без преобразования (волноводы, световоды);
- ИП с изменением сопротивления металлического проводника при деформации или изменении температуры (проводочные, фольговые тензорезисторы, электротермометры);
- ИП с изменением сопротивления полупроводника при деформации или изменении температуры (пьезорезистивные, терморезистивные, транзисторные);
- емкостные ИП;
- индуктивные ИП;
- пьезоэлектрические ИП;
- электронные ИП;
- электрохимические ИП;
- фотоэлектрические ИП;
- с использованием эффекта радиоактивности;
- оптические;
- акустические и др.

1.7. Классификация по академику Ахутину

По академику Ахутину принята следующая классификация устройств съема медико-биологической информации (МБИ): по принципу действия все датчики МБИ делятся на две группы - биоуправляемые и энергетические.

Биоуправляемые - изменяют свои параметры непосредственно под воздействием измеряемой величины. Биоуправляемые подразделяются на активные (генераторные) и пассивные (параметрические).

Генераторным датчиком называется такой преобразователь, в котором под воздействием измеряемой величины генерируется электрический сигнал. К ним относят пьезоэлектрические, термоэлектрические, индукционные датчики.

В параметрическом датчике под влиянием измеряемой величины изменяется какой-либо его параметр. Если изменяется индуктивность - то датчик индуктивный, если емкость - емкостной, если омическое сопротивление - резистивный.

Энергетические датчики создают в исследуемом органе немодулированный энергетический поток (световой, электромагнитный, ультразвуковой и т. д.) с постоянными во времени характеристикаами. Измеряемый параметр влияет на характеристики энергетического потока и изменяет его показания пропорционально своим изменениям. Энергетические датчики нуждаются в дополнительном источнике для создания энергетического потока. Наиболее распространены ультразвуковые и фотоэлектрические датчики.

Электролы - проводники, соединяющие измерительную аппаратуру с биологической средой.

2. Основные специальные и метрологические требования к биомедицинским ИП

- отсутствие воздействия на функциональные свойства организма (не должны раздражать);
- необходимая чувствительность и точность;
- отсутствие или малая величина гистерезиса - устраняет неоднозначность показаний;
- стабильность характеристик во времени;
- определяемая динамическая характеристика (частотный диапазон, малая постоянная времени установления);
 - высокие перегрузочные способности;
 - устойчивость к химическим и биологическим воздействиям;
 - незначительное влияние на работу других приборов;
 - направленность действия (малое влияние изменения нагрузки на параметры выходной цепи);
 - электробезопасность;
 - безотказная работа, надежность;
 - простота, технологичность конструкции;
 - удобство эксплуатации;
 - унифицированность и взаимозаменяемость;
 - устойчивость к агрессивным средам;

Перечисленные характеристики применяются для описания всех преобразователей: и медицинских, и промышленных. Однако, есть несколько характеристик, которые особенно важны, когда преобразователи применяются в медицинской практике. Как правило, медицинские сигналы имеют

меньшую интенсивность, чем сигналы в промышленных установках, поэтому в медицине нужны более чувствительные преобразователи. Важно также, чтобы преобразователь оказывал минимальное воздействие на пациента. Кроме того, преобразователи предназначенные для применения в клиниках, должны быть легко доступными для чистки, стерилизации во избежание переноса инфекции с одного больного на другого.

Преобразователи, предназначенные для длительного использования при вживлении в организм, должны быть изготовлены из материала химически нейтрального, не раздражающего ткань, чтобы они не вызывали воспаления или не отторгались организмом. Небезразличны масса и габариты преобразователя. Например, преобразователь, измеряющий давление в полости сердца, должен быть настолько малым, чтобы его можно было ввести через сосудистую систему пациента. Крайне важно, чтобы медицинские преобразователи были очень надежными, потому что данные с них получаемые часто играют решающую роль в постановке диагноза и исцелении пациента.

1.1. Определения и основные характеристики

Физическая величина m , характеризующая объект измерений (температура, давление и др.), называется измеряемой величиной. Совокупность операций, направленных на установление численного значения физической величины, составляет процесс измерения. Если при измерении используются электронные средства обработки сигнала, необходимо сначала преобразовать измеряемый параметр в эквивалентную электрическую величину, причем как можно точнее. Это значит, что полученная электрическая величина должна содержать всю информацию об измеряемом параметре. Датчик — это устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение или импеданс), являющийся функцией измеряемой величины:

$$s = F(m).$$

Здесь s — выходная величина датчика, а m — входная величина (рис. 1.1). Измерив значение s , можно определить тем самым значение m (рис. 1.2). Соотношение $s=F(m)$ выражает в общей теоретической форме физические законы, положенные в основу работы датчиков. Будучи выраженнымми численно, эти законы предопределяют выбор конструкций (геометрии и размеров) и материалов для их изготовления, допустимые характеристики окружающей среды, при которых датчики могут работать, и условия применения. Для всех датчиков характеристика преобразования — соотношение $s=F(m)$ — в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки, при проведении которой для ряда точно известных значений m измеряют соответствующие значения s , что позволяет построить градуировочную кривую (рис. 1.2, а). Из этой кривой для всех полученных в результате измерения значений s можно найти соответствующие значения искомой величины m (рис. 1.2, б).

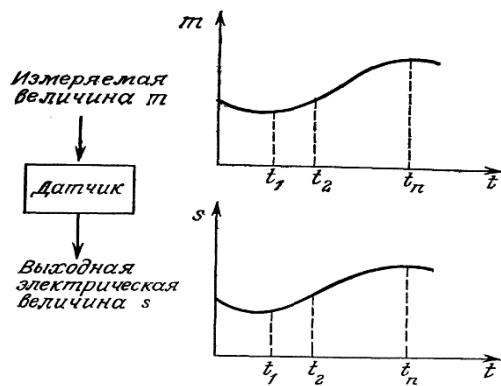


Рис. 1.1. Пример изменения во времени измеряемой величины m и соответствующей реакции s датчика.

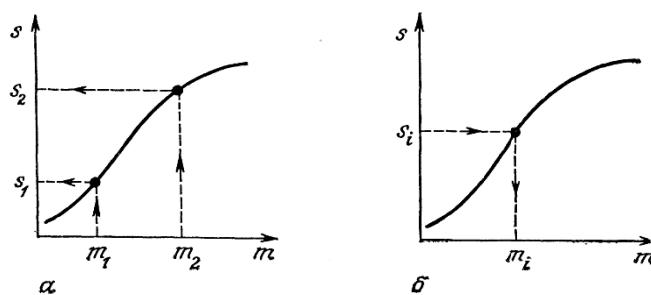


Рис. 1.2. Градуировочные характеристики датчика.
а — получение градуировочной кривой по известным значениям измеряемой величины m ; б — использование градуировочной кривой для определения величины m .

Для удобства измерений датчик стараются построить или, по крайней мере, использовать таким образом, чтобы существо-

вала линейная зависимость между малыми приращениями выходной Δs и входной Δm величин:

$$\Delta s = S \Delta m.$$

Здесь S — чувствительность датчика.

Важнейшей проблемой при проектировании и использовании датчика является обеспечение постоянства чувствительности, которая должна как можно меньше зависеть от значений m (предопределяя линейность характеристики преобразования) и частоты их изменений, от времени и от воздействия других физических величин, характеризующих не сам объект, а его окружение (они называются влияющими на результаты измерений величинами).

Датчик с точки зрения вида сигнала на его выходе может быть активным — генератором, выдающим заряд, напряжение или ток, — либо пассивным, с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимися соответственно входной величине¹⁾.

Различие между активными и пассивными датчиками обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в датчиках физических явлений.

Электрический сигнал — это переменная составляющая тока или напряжения, которая несет информацию, связанную с измеряемой величиной; амплитуда и частота сигнала должны быть непосредственно связаны с амплитудой и частотой измеряемой величины²⁾. Активный датчик является источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала, а измерение изменений параметров импеданса пассивного датчика производится косвенно, по изменению тока или напряжения в результате его обязательного включения в схему с внешним источником питания. Электрическая схема, непосредственно связанная с пассивным датчиком, формирует его сигнал, и, таким образом, совокупность датчика и этой электрической схемы является источником электрического сигнала.

1.2. Активные датчики

Принцип действия активного датчика основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму энергии. Наиболее важные из этих физических явлений указаны в табл. 1.1, а принципы их технической реализации иллюстрируют схемы на рис. 1.3.

Таблица 1.1. Физические эффекты, используемые для построения активных датчиков

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический эффект Внешний фотоэффект Внутренний фотоэффект в полупроводнике с $p-n$ -переходом Фотоэлектромагнитный эффект	Заряд Ток Напряжение Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

1.3. Пассивные датчики

В пассивных датчиках некоторые параметры выходного импеданса могут меняться под воздействием измеряемой величины.

Импеданс датчика, с одной стороны, обусловлен геометрией и размерами его элементов, а с другой стороны — свойствами материалов: удельным сопротивлением ρ , магнитной проницаемостью μ и диэлектрической постоянной ϵ .

Изменения импеданса могут быть, таким образом, вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов датчика, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и на другое одновременно. Геометрические размеры датчика и параметры его импеданса могут изменяться, если датчик содержит подвижный или деформирующийся элемент.

В табл. 1.2 указан ряд физических эффектов, связанных с преобразованием значений электрических характеристик пассивных датчиков. Среди них нужно отметить резистивные датчики.

Таблица 1.2. Физические принципы преобразования величин и материалы, используемые для построения пассивных датчиков

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Перемещение	Магнитная проницаемость Сопротивление	Ферромагнитные сплавы Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

Импеданс пассивного датчика и его изменения можно измерить не иначе, как включая датчик в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала. Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов:

- потенциометрическая схема, содержащая соединенные параллельно источник напряжения и датчик-потенциометр;
- мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение импеданса датчика;
- колебательный контур, включающий в себя импеданс датчика (при этом контур является частью генератора колебаний и определяет его частоту);
- операционный усилитель, в котором импеданс датчика является одним из элементов, определяющим коэффициент усиления.

Выбор схемы формирования сигнала является важным этапом в реализации измерений, от которого зависят метрологические характеристики измерительных комплексов в целом — погрешность, чувствительность, линейность, невосприимчивость к влиянию определенных величин. Описание схем измерений и обработки сигналов содержится в гл. 3.

1.4. Комбинированные датчики

При измерениях некоторых незелектрических величин не всегда удается преобразовать их непосредственно в электрическую величину. В этих случаях осуществляют двойное преобразование исходной (первичной) измеряемой величины — в промежуточную незелектрическую величину, которую преобразуют затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух соответствующих измерительных преобразователей образует комбинированный датчик (рис. 1.4).

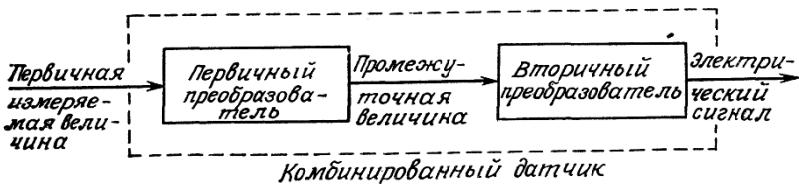


Рис. 1.4. Блок-схема комбинированного датчика.

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента, к которым чувствителен вторичный преобразователь.

Так, например, растягивающее усилие F , воздействуя на стержень длиной L с поперечным сечением A и модулем Юнга Y , вызывает его деформацию $\Delta L/L$, которую можно измерить по изменению сопротивления резистивного датчика, сочлененного со стержнем через механизм передачи. Зная соотношение для первичного преобразователя, связывающее растягивающее усилие с деформацией

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \frac{F}{A},$$

и соотношение для вторичного преобразователя, связывающее его входную величину — деформацию — с реакцией на выходе, т. е.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

(здесь K — коэффициент вторичного преобразования), можно вывести окончательную формулу, связывающую растягивающее усилие с изменением сопротивления, для датчика в целом:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{Y} \frac{F}{A}.$$

1.5. Влияющие величины

Датчик в определенных условиях эксплуатации может подвергаться воздействию не только измеряемой величины, но и других физических величин, именуемых влияющими, к которым чувствителен датчик. Вариации этих паразитных воздействий могут привести к изменениям выходного электрического сигнала датчика и появлению соответствующей погрешности измерений.

Основными физическими величинами, влияющими на погрешность датчиков, являются:

- температура, которая изменяет электрические и механические характеристики датчика, а также размеры составляющих его деталей;
- давление, ускорение и вибрации, вызывающие в определенных элементах датчиков деформации и напряжения, изменяющие их чувствительность;
- влажность, которая может вызвать изменение определенных электрических характеристик элементов, таких, как диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление, вследствие чего возникает опасность нарушения электрической изоляции между отдельными конструктивными элементами датчика (либо между датчиком и окружающей средой);
- постоянное или переменное магнитное поле, индуцирующее в проводниках э.д.с., которая накладывается на полезный сигнал, и изменяющее электрические характеристики некоторых чувствительных элементов, например, удельное сопротивление магниторезисторов;
- изменение параметров напряжения питания — его амплитуды и частоты.

Если обозначить величины, влияющие на датчик, $g_1, g_2 \dots$, то связь между выходным электрическим сигналом s и измеряемой величиной m , которая в идеальном случае выражается как

$$s = F(m),$$

преобразуется к виду

$$s = F(m, g_1, g_2 \dots).$$

Для того чтобы в этом случае определить измеряемую величину по выходному сигналу датчика, без внесенной влияющими величинами погрешности, необходимо:

- либо снизить значения влияющих величин соответствующей защитой датчика, используя, например, антивибрационное основание, магнитные экраны и др.;
- либо стабилизировать влияющие величины и градуировать датчик для этих условий, используя, например, термостат, источник стабилизированного напряжения питания и др.;
- либо использовать такую схему, которая позволила бы скомпенсировать влияние паразитных величин, например, мост Уитстона с двумя одинаковыми датчиками, один из которых предназначен для измерений, а второй — для компенсации погрешности, вызванной влияющими факторами.

2.3. Пределы применимости датчиков

Если механические, тепловые или электрические воздействия, которым подвергается датчик, превышают указанный изготовителем предел, то изменения характеристик датчика могут отклоняться от известных. Следовательно, необходимо, чтобы потребитель знал пределы применимости датчика и правильно оценивал риск в случаях, когда приходится выходить за эти пределы.

Область применения, в которой обеспечиваются номинальные параметры. Эта область соответствует нормальным условиям применения датчика. Границы области определяются теми крайними значениями измеряемой величины либо физических параметров, связанных с влияющими величинами, за пределами которых нарушаются паспортные номинальные значения параметров, характеризующих работу датчика.

Область обратимого ухудшения параметров. Это та область, в которой значения измеряемой величины либо физических параметров, связанных с влияющими величинами, выходят за пределы области номинальных параметров, но остаются внутри области, где метрологические характеристики датчика если и могут ухудшиться, то не необратимо, т. е. датчик снова обретает свои номинальные параметры, если условия его применения становятся нормальными.

Область необратимого ухудшения параметров. Когда значения либо измеряемой величины, либо физических параметров, связанных с влияющими величинами, выходят за пределы области обратимого изменения параметров, но остаются внутри области, где датчик еще сохраняет работоспособность, то характеристики датчика изменяются необратимым образом и при возврате к нормальным условиям применения датчика потребуется, следовательно, новая градуировка.

Пределы измерений. Они определяются разностью предельных величин, ограничивающих диапазон измеряемой величины, в котором работа датчика удовлетворяет поставленным условиям. Диапазон измеряемой величины, соответствующий преде-

лам измерений, часто совпадает с областью номинальных параметров, но эти пределы могут расширяться или сужаться при изменении требований.

Пример характеристики пределов применимости

Пьезорезистивный датчик силы типа N556-1 (фирма-изготовитель JPB)

Область	Измеряемая величина	Температура
Номинальных параметров	до 10 Н	от 0 до 60 °C
Обратимых изменений	до 15 Н	от -20 до 100 °C
Необратимых изменений	до 30 Н	от -50 до 120 °C

2.4. Чувствительность

2.4.1. Основные определения

Чувствительность — определяющий параметр для выбора датчика; в общем случае чувствительность S определяется для диапазона близ некоторого постоянного значения измеряемой величины m_i как отношение вариации сигнала Δs на выходе к изменению Δm измеряемой величины, которое вызвало эту вариацию сигнала:

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \Big|_{m=m_i}.$$

Значение чувствительности в заданных условиях применения обычно определяется изготовителем; этот параметр позволяет потребителю оценить выходной сигнал датчика, зная пределы изменения измеряемой величины, и выбрать датчик для измерительной системы, отвечающей требованиям и условиям измерения.

Единицы, в которых выражается S , зависят от принципа работы датчика и от природы измеряемой величины — Ом/ $^{\circ}\text{C}$ для терморезистора и мкВ/ $^{\circ}\text{C}$, например, для термопары.

Частота изменений измеряемой величины является другим важным параметром, влияющим на чувствительность. В зависимости от частоты существуют два различных режима работы датчиков, с которыми связаны соответствующие параметры чувствительности:

- а) статический режим работы, при котором измеряемая величина постоянна или меняется очень медленно (постоянный поток излучения, постоянное ускорение);
- б) динамический режим работы, при котором измеряемая величина меняется быстро (модулированный поток излучения, ускорение, связанное с вибрациями конструкции).

Некоторые датчики по самой своей природе работают только в динамическом режиме (например микрофоны).

2.4.2. Чувствительность в статическом режиме

При статической градуировке устанавливается ряд последовательно возрастающих постоянных значений измеряемой величины m_i и определяются соответствующие им после достижения установившихся значений электрические сигналы s_i . Графическое представление результатов градуировки дает статическую характеристику. Рабочая точка датчика Q_i соответствует определенным значениям m_i и s_i статической характеристики.

Из общего определения чувствительности, данного ранее, следует определение статической чувствительности в рабочей точке Q_i как отношения приращения Δs к вызвавшему его приращению Δm ; следовательно, чувствительность в статическом режиме определяется наклоном статической характеристики в рабочей точке. Если эта характеристика не является прямой линией, то чувствительность зависит от рабочей точки.

Отношение величины s_i на выходе к соответствующему значению m_i измеряемой величины называют статическим коэффициентом преобразования:

$$r_j = \left. \frac{s}{m} \right|_{Q_i}.$$

Это отношение не зависит от рабочей точки Q_i и совпадает с чувствительностью S только в том случае, когда статическая характеристика является прямой, проходящей через начало координат.

2.4.3. Чувствительность в динамическом режиме и частотная характеристика

Динамическая чувствительность может быть определена, когда измеряемая величина является периодической функцией времени; в этих условиях выходной сигнал s в установившемся режиме имеет ту же периодичность, что и измеряемая величина.

Чувствительность, которая, в общем, является отношением изменения s к изменению t , определяется в этом случае выражением

$$S = \frac{s_1}{m_1} \Big|_{Q_0}.$$

Зависимость чувствительности в динамическом режиме от частоты f , т. е. $S(f)$, является частотной характеристикой датчика.

Выраженная в наиболее общей форме связь между величинами s и t представляет собой дифференциальное уравнение, которое в зависимости от конкретного случая может быть уравнением первого или второго порядка; выходной сигнал в режиме непрерывного синусоидального воздействия можно описать просто, приводя это дифференциальное уравнение к эквивалентной комплексной форме путем преобразования:

$$\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega \quad \text{и} \quad \frac{d^2}{dt^2} \rightarrow -\omega^2.$$

Частотные характеристики связаны с порядком дифференциального уравнения, так что различают описания систем первого и второго порядка.

2.4.4. Линейность характеристики

Понятие линейности. Говорят, что система линейна в определенном диапазоне измеряемых величин, если ее чувствительность не зависит от значения измеряемой величины, т. е. остается постоянной. В диапазоне линейности характеристики датчика электрический сигнал во всех элементах измерительной цепи пропорционален значениям измеряемой величины, если все другие устройства, связанные с датчиками (мосты, усилители), также линейны. В таком случае значительно упрощается последующая обработка результатов измерений. Выгода линейности столь бесспорна, что при нелинейности датчика оказывается целесообразным делать измерительную систему линейной, включая в нее устройства коррекции. Этот процесс называют линеаризацией; он направлен на то, чтобы сделать сигнал пропорциональным вариациям измеряемой величины (см. разд. 4.2).

В статическом режиме (разд. 2.4.2) линейность определяется наличием прямолинейного участка статической характеристики, и работа датчика остается линейной, пока вариации измеряемой величины не выходят за пределы этого участка. В ди-

Усредненная градуировочная прямая и отклонение от линейности. При определении градуировочной характеристики датчика по полученному некоторому числу пар точек (s_i и m_i) график этой характеристики будет несколько отличаться от прямой линии из-за неточности измерений и(или) несовершенства изготовления датчика. Распределение экспериментальных данных

можно аппроксимировать уравнением прямой, что обычно делают методом наименьших квадратов. Для такой прямой сумма квадратов отклонений ε_s экспериментальных точек минимальна.

Установлено, что приближение к прямой вида

$$s = am + b$$

достигается при

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - \sum s_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2},$$

$$b = \frac{\sum s_i \cdot \sum m_i^2 - \sum s_i \cdot m_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2},$$

где N — число градуировочных точек.

Отклонение от линейности — это показатель, который позволяет оценить линейность градуировочной характеристики. Его определяют по максимальному отклонению градуировочной кривой от прямой линии, а отклонение выражают в процентах от максимального значения измеряемой величины в заданном диапазоне измерений. На рис. 2.8 в качестве примера приведена

2.5. Быстродействие датчика

Описанная выше амплитудно-частотная характеристика определяет работу датчика в установившемся режиме при гармоническом (синусоидальном) входном воздействии.

В момент времени воздействия измеряемой величины на датчик или в момент ее резкого изменения установившемуся режиму предшествует переходный режим. Для обеспечения правильных измерений оценка переходного режима очень важна. Время переходного процесса системы можно определить решением дифференциального уравнения, описывающего эту систему.

2.5.1. Определения

Быстродействие — это параметр датчика, позволяющий оценить, как выходная величина следует во времени за изменениями измеряемой величины. Быстродействие, таким образом, свя-

зано со временем, необходимым для того, чтобы вклад переходного режима в выходную величину стал пренебрежимо мал в условиях требуемой точности. Однако характер переходного режима не зависит от закона изменения измеряемой величины; он зависит только от свойств элементов измерительной системы, непосредственно связанных с датчиком. Следовательно, вводя характеристики быстродействия для частных случаев вариаций измеряемой величины, можно оценивать быстродействие независимо от реального закона изменения рассматриваемой измеряемой величины. Параметр, используемый для количественного описания быстродействия, — это время установления, т. е. интервал времени, который должен пройти после резкого ступенчатого изменения измеряемой величины, чтобы сигнал на выходе датчика достиг уровня, отличающегося на определенную, обычно фиксированную величину ε (%) от установившегося значения. Время установления нужно, следовательно, всегда определять, указывая величину ε , которой оно соответствует, $t_r(\varepsilon\%)$.

Чем меньше время установления, тем выше быстродействие датчика. Время установления, характеризующее скорость протекания переходного процесса, можно выразить в функции параметров, определяющих переходный режим.

В случае ступенчатого изменения измеряемой величины, вызывающего увеличение выходного сигнала, обычно различают:

а) время задержки нарастания t_{dm} — время, необходимое для того, чтобы сигнал s на выходе увеличился от начального значения до 10% своего полного изменения;

б) время нарастания t_m — время, соответствующее увеличению выходного сигнала s от 10 до 90% своего полного изменения.

В случае ступенчатого изменения измеряемой величины, вызывающего уменьшение выходного сигнала, различают:

а) время задержки уменьшения (или спада) t_{dc} — время, необходимое, чтобы сигнал s на выходе уменьшился от начального значения до 10% своего полного изменения;

б) время убывания (спада) t_c — время, соответствующее уменьшению выходного сигнала s от 10 до 90% своего полного изменения.