

8. ДАТЧИКИ. КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

Использование микропроцессоров позволяет создавать очень сложные инструменты, находящие свое применение в различных областях человеческой деятельности. Микропроцессоры являются цифровыми устройствами, работающими с двоичными кодами. В виде двоичных кодов можно представить практически любые электрические сигналы. Однако мы живем в аналоговом мире, где большинство устройств не являются цифровыми. Сигналы окружающего нас мира не всегда бывают электрическими. Для того, чтобы сложные интеллектуальные цифровые системы могли воспринимать информацию из внешнего мира, необходимы интерфейсные устройства, преобразующие разнообразные физические величины в электрические сигналы. Такими интерфейсными устройствами являются датчики.

Датчик – это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов. Под внешним воздействием понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которую необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал. Назначение датчиков – преобразование физической величины (электрической или чаще всего неэлектрической) в электрический сигнал, который может быть далее усилен, преобразован при помощи электронных устройств и/или передан по линиям передач. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, описываемые такими характеристиками как амплитуда, частота, фаза или цифровым кодом. Набор характеристик, описывающих сигнал, называется форматом выходного сигнала. Каждый датчик характеризуется набором входных параметров (любой физической природы) и набором выходных параметров.

Все датчики можно разделить на датчики прямого действия и составные. Датчики прямого действия преобразуют внешнее воздействие непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление (например, фотоэффект). В составных датчиках выходной электрический сигнал получают после проведения нескольких преобразований энергии из одного вида в другой и наконец в электрическую. В составе измерительных систем датчики могут быть наружными и встроенными. Наружные реагируют на внешние воздействия и сообщают системе об изменениях в окружающих условиях. Встроенные осуществляют контроль за функционированием измери-

тельных систем, что необходимо для поддержания корректной работы всех внутренних устройств системы.

Системы классификации датчиков могут быть самыми разнообразными в зависимости от цели проведения классификации. Например, одна из наиболее распространенных – датчики могут быть разделены на активные и пассивные. Активные датчики для своей работы нуждаются в электрическом сигнале возбуждения от внешнего источника энергии (например, резистивный тензодатчик, меняющий свое сопротивление в зависимости от величины деформации). Эти датчики называются также параметрическими. Пассивные датчики не нуждаются в дополнительном источнике энергии и в ответ на внешнее воздействие или его изменение на выходе такого датчика появляется электрический сигнал (фотодиод, например). В зависимости от выбора точки отсчета датчики можно разделить на абсолютные и относительные. Абсолютный датчик определяет внешний сигнал в абсолютных физических единицах, не зависящих от условий измерений. Выходной сигнал относительного датчика в каждом измерении может трактоваться по-разному, в зависимости от условий измерений. Например, термистор является абсолютным датчиком, поскольку его электрическое сопротивление напрямую зависит от абсолютной температуры, в то время как термопара является относительным датчиком, поскольку напряжение на его выходе зависит от градиента температуры, а не абсолютного ее значения. Классификацию датчиков можно проводить и по другим признакам. Например, по их характеристикам, материалам, из которых они изготовлены, по средствам детектирования, механизмам преобразования энергии воздействия в электрический сигнал, областям применения, видам внешних воздействий и т. д.

Физические принципы работы датчиков

Датчики прямого действия строятся на основе физических явлений, позволяющих в ответ на неэлектрические воздействия получать на выходе электрические сигналы. К таким явлениям относятся, например, фотоэффект, пьезоэлектрический эффект, эффект Зеебека (термоэлектрический эффект) и др. Рассмотрим некоторые свойства материалов и физические явления, используемые при разработке датчиков.

Температурная чувствительность. Проводимость материала зависит от изменения температуры t , и в сравнительно узком диапазоне может быть выражена формулой:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (7)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала при эталонной температуре t_0 (обычно равной 0 или 25 °С), α – температурный коэффициент сопро-

тивления (ТКС), Δt – разность текущей температуры t и эталонной t_0 . В более широком диапазоне зависимость удельного сопротивления от температуры является нелинейной функцией. Металлы имеют положительный ТКС, а многие полупроводники и оксиды – отрицательный. Для резисторов, используемых в электронных схемах, желательно применять материалы с низким температурным коэффициентом, для построения же температурных датчиков резисторы должны обладать высоким ТКС. Резистивные датчики температуры называют также термисторами или температурными детекторами. Наиболее популярным температурным детектором является платиновый, имеющий значение ТКС $3,7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и работающий в широком температурном диапазоне $200 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Термисторы – это резисторы с большим значением либо положительного, либо отрицательного ТКС. Их изготавливают из полупроводников, состоящих из оксидов одного или нескольких металлов, таких как никель, марганец, кобальт, титан, железо. Оксиды других металлов применяются очень редко. Сопротивления термисторов лежат в пределах от долей Ом до многих МОм. Они выполняются в форме диска, капли, трубки, пластины. При применении современных тонкопленочных технологий возможно изготовить термистор методом печатного монтажа на керамической подложке. Термисторы с отрицательным ТКС изготавливают из платины, спеченной с керамикой. Термисторы обладают нелинейной зависимостью сопротивления от температуры, которую можно аппроксимировать несколькими вариантами уравнений, одним из которых является следующий:

$$R_t = R_0 \cdot e^{\beta(1/T - 1/T_0)},$$

где T_0 – калибровочная температура в Кельвинах, R_0 – значение сопротивления при температуре калибровки, β – характеристическая температура материала (в Кельвинах). Обычно значения β лежат в диапазоне $3000 \div 5000 \text{ K}$, и в пределах узкой зоны измерений могут считаться независимыми от температуры. Традиционно термисторы калибруются и тестируются при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 298,15 \text{ K}$), а температурные детекторы – при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273,15 \text{ K}$).

Тензочувствительность – изменение электрического сопротивления материала при его механической деформации. Свойство, во многих случаях являющееся причиной возникновения погрешностей, однако дающее возможность реализовать датчики, реагирующие на механическое напряжение σ :

$$\sigma = E \frac{dl}{l}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга материала, dl/l – относительная деформация материала. Если рассмотреть в качестве примера изменение сопротивления провода при его растяжении, получим из (8):

$$\frac{dR}{R} = S \cdot \frac{dl}{l},$$

где S – коэффициент тензочувствительности, dR/R – относительное изменение сопротивления провода. Для металлических проводников значение коэффициента тензочувствительности лежит в пределах $2 \div 6$, для полупроводников – $40 \div 200$. В настоящее время тензоэлементы изготавливаются из фольги константана (сплав никеля и меди) или монокристаллических полупроводниковых материалов (например, кремния, легированного бором). Чувствительность полупроводниковых тензоэлементов существенно зависит от температуры, поэтому при проведении измерений в широком температурном диапазоне необходимо проводить соответствующую компенсацию.

Влагочувствительность. При выборе материала для резистора необходимо учитывать и чувствительность его удельного сопротивления к такому фактору воздействия окружающей среды, как влажность. На основе гигроскопичных материалов, удельное сопротивление которых сильно зависит от концентрации поглощенных ими молекул воды, строят резисторы, реагирующие на изменение влажности. Такие устройства называют гигристорами, они применяются при построении датчиков влажности. Зависимость сопротивления гигристоров от влажности носит нелинейный характер, что необходимо учитывать при проведении калибровки и обработке результатов измерений.

Пьезоэлектрический эффект заключается в образовании электрических зарядов при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, поляризованных керамических материалах, некоторых полимерах (например, в поливинилденфториде). Для «сбора» электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах среза прикрепляют электроды. Построенный таким образом пьезоэлектрический датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Заряды формируются только в местах приложения силы, поэтому металлическими электродами, варьируя их форму, можно либо выровнять заряды вдоль всей поверхности кристалла, лишив датчик избирательности, либо определить точное место приложения внешней силы.

Пьезоэлектрический эффект является обратимым явлением, т. е. приложенное к кристаллу электрическое напряжение приводит к появлению механической деформации, что широко применяется в разных типах пьезоэлектрических преобразователей. Пьезоэлектрические сенсоры являются чувствительными только к изменению внешних усилий, а не к их постоянному уровню, т. е. это устройства переменного, а не постоянного тока. Чувствительность пьезоэлектриков зависит от температуры, причем некоторые материалы теряют чувствительность с ростом температуры, у других же изменение чувствительности зависит от температурного диапазона (т.е. может увеличиваться в одном диапазоне и уменьшаться в другом). В настоящее время самыми популярными материалами для изготовления пьезоэлектрических датчиков являются различные типы керамики.

Пьезоэлектрические элементы могут использоваться либо в форме кристалла, либо многослойной структуры, в которой отдельные пластины соединяются при помощи электродов, размещенных между ними. Когда, например, к двухслойному датчику (рис. 21) прикладывается внешняя сила (направление действия указано на рисунке стрелкой), верхняя часть его растягивается, тогда как нижняя сжимается, что при соответствующем включении датчика приводит к удвоению выходного сигнала. Двойные сенсоры могут включаться как параллельно, так и последовательно. В терминах эквивалентных электрических схем пьезоэлектрический датчик представляет собой параллельное соединение сопротивления утечки, емкости и источника тока. Сопротивление утечки, как правило, имеет очень большие значения (до $10^{12} \div 10^{14}$ Ом), т.е. такой датчик обладает очень высоким выходным импедансом. Для согласования такого устройства с последующими электронными цепями необходимо использовать соответствующие интерфейсы, представляющие собой преобразователи заряда или тока в напряжение, или усилители напряжения, имеющие высокие входные сопротивления.

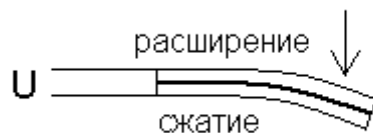


Рис. 21. Двухслойный пьезоэлектрический датчик (U –напряжение выхода)

В последнее время пьезоэлектрические пленки (в том числе и полимерные) обретают большую популярность, поскольку обладают целым набором уникальных свойств. Например, широкий частотный диапазон

(от 0,001 до 10^9 Гц), низкий акустический импеданс, высокое выходное напряжение (в 10 раз выше, чем у керамических материалов при приложении одинаковых механических сил), высокая электрическая и механическая прочность и ударостойкость, устойчивость к влажности, большинству химических реактивов и другие. Кроме того, им можно придавать практически любую требуемую форму и соединять обычными клеями. В то же время у них есть и недостатки, к которым в первую очередь следует отнести существенные ограничения по рабочей температуре (не более $135\text{ }^\circ\text{C}$, а для некоторых пленок и $100\text{ }^\circ\text{C}$). Кроме того их необходимо экранировать от высокочастотных электромагнитных помех и радиочастотных шумов, поскольку как только на пленку наносятся электроды, она становится чувствительной к электромагнитному излучению.

В миниатюрных полупроводниковых датчиках пьезоэлектрический эффект является основным средством преобразования механической деформации в электрические сигналы и наоборот. Однако следует помнить, что этот эффект применим для преобразования переменных входных сигналов и не годится для стационарных, либо медленно меняющихся внешних воздействий. Кремний сам по себе не обладает пьезоэлектрическими свойствами. Поэтому для придания ему таких свойств на его поверхность наносят кристаллические слои пьезоматериалов. Например, ZnO, AlN и другие.

Эффект Холла – возникновение в твердотельном проводнике с током, помещенном в магнитное поле, электрического поля в направлении, перпендикулярном направлению тока и магнитного поля. Возникающая разность потенциалов – напряжение Холла (U_X) – зависит от величины и направления приложенного магнитного поля и электрического тока:

$$U_X = h_X \cdot I \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

где h_X – полная чувствительность датчика (зависит от коэффициента Холла R), I – сила электрического тока через проводник, B магнитная индукция поля, α – угол между вектором магнитной индукции поля и плоскостью проводника. В зависимости от кристаллической структуры материала основными носителями заряда в нем могут быть либо электроны, либо дырки. Поскольку коэффициент Холла зависит от концентрации свободных носителей в проводнике ($R \sim (nq)^{-1}$) и знака заряда носителей, то эффект Холла может быть либо положительным, либо отрицательным. Линейный датчик Холла (рис. 22) обычно размещается в корпусе с четырьмя выводами. Два из них для подключения тока управления называются управляющими, сопротивление между ними – сопротивление управляющей цепи R_i), выводы для измерения выходного напряжения

называются дифференциальными выводами (сопротивление между ними – выходное дифференциальное сопротивление R_0).

Датчик характеризуется следующими параметрами: сопротивлениями R_i и R_0 , напряжением смещения при отсутствии магнитного поля, чувствительностью и температурным коэффициентом чувствительности. Большинство датчиков Холла изготавливают из кремния. Они бывают простые и интегрированные на одной подложке с интерфейсными электронными схемами. Такая особенность важна при построении прецизионных датчиков, поскольку напряжение Холла обычно довольно мало по величине. Встроенная интерфейсная схема может иметь в своем составе пороговый детектор, превращающий датчик в устройство с двумя положениями – выходной сигнал равен нулю при величине магнитного поля ниже порогового значения, и единице, когда превышает пороговое значение.

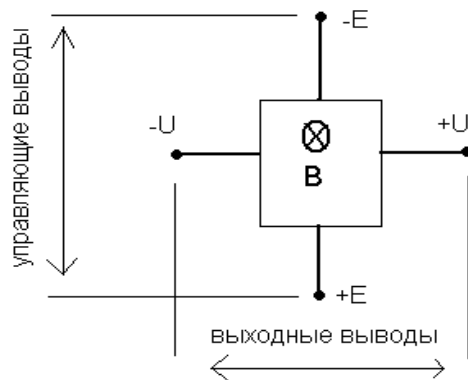


Рис. 22. Четыре вывода линейного датчика Холла

Поскольку кремний обладает тензорезистивными свойствами, датчики, реализованные на его основе, реагируют на механические напряжения, поэтому необходимо минимизировать нагрузки на корпус датчика и подводящие провода. Кроме того, датчики Холла являются чувствительными к температуре – ее колебания приводят к изменению сопротивления чувствительных элементов. Если последний подключен к источнику напряжения, изменения сопротивления будут влиять на значение сопротивления, а, следовательно, и на ток в цепи управления, поэтому предпочтительнее управляющие выводы подключать к источнику тока, а не напряжения.

Термоэлектричество. Эффект Зеебека – возникновение ЭДС в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при разной температуре. Этот эффект, как и эффект Пельтье, является примером прямо-

го преобразования тепловой энергии в электрическую и лежат в основе некоторых устройства датчиков. Эффект Зеебека применяется в таких популярных датчиках температуры как термопары, а также в термоэлементах (представляют собой фактически несколько последовательно соединенных термопар), которые часто в наше время применяются для детектирования тепловых излучений. Кремний обладает достаточно большим коэффициентом Зеебека, поэтому на его основе изготавливают высокочувствительные термоэлектрические детекторы.

Эффект Пельтье – выделение или поглощение теплоты при прохождении электрического тока через контакт двух различных проводников. Это явление характерно как для случая, когда ток поступает от внешних источников, так и в случае, когда он индуцируется от термопары вследствие эффекта Зеебека. Эффект Пельтье используется, когда надо подвести или отвести тепло от места соединения материалов, что осуществляется изменением направления электрического тока. Это нашло свое применение в устройствах, где необходимо осуществление точного контроля температуры. Тепло Пельтье, в отличие от Джоулева тепла, линейно зависит от силы тока. Величина и направленность тепловой энергии Пельтье не зависит от физической природы соединения двух материалов (т. е. провода могут быть спаяны или скручены, либо склеены и т. д.), а полностью определяется их объемными термоэлектрическими свойствами. О том, что в местах соединения двух и более различных металлов, имеющих разную температуру, всегда возникает термоэлектрический ток, необходимо помнить при разработке устройств и схем.

Световое излучение – очень эффективная форма энергии, по изменению которой можно судить о многих внешних воздействиях - расстоянии, движении, температуре, химическом составе и т. д. Свет имеет электромагнитную природу, его можно рассматривать как распространение энергии квантов или электромагнитных волн. В разных диапазонах спектра используются различные свойства света. Свет может преломляться, отражаться, поглощаться, интерферировать, поляризоваться, распространяться. Все эти явления можно использовать для построения датчиков и оптических компонент датчиков и измерительных систем. Перед тем как управлять светом, его необходимо получить. Источники света разделяются на естественные и искусственные. К естественным помимо Солнца, Луны и других астрономических объектов относятся также все материальные объекты, излучающие в том или ином спектральном диапазоне (в том числе и источники тепла – ИК-диапазон). Искусственные источники света – это нити накаливания электрических ламп, светоизлучающие диоды, газоразрядные лампы, лазеры, лазерные диоды, нагрева-

тели, охладители. При разработке методов и систем управления светом в датчиках задача разработчиков заключается в том, чтобы определить количественное изменение параметров, характеризующих свет, и соотнести это изменение с величиной внешних воздействий. Коэффициенты отражения ослабления и пропускания, коэффициент преломления, характеристики пропускания света различными средами, спектральный диапазон излучений и многие другие характеристики, как источника излучения, так и сред, взаимодействующих со световым потоком или лучом, необходимо учитывать при разработке соответствующих устройств.

Наряду с вышеперечисленными явлениями и свойствами при построении датчиков и измерительных систем используются и многие другие, например, звуковые волны, тепловые свойства материалов, пироэлектрический эффект, диэлектрическая проницаемость, магнетизм и т. д.

Характеристики датчиков

К наиболее часто используемым характеристикам датчиков относятся передаточная функция, диапазоны входных и выходных значений, точность, наличие гистерезиса, нелинейность, разрешающая способность, выходной импеданс, динамические характеристики, величина сигнала возбуждения, а также некоторые другие.

Для каждого датчика можно вывести идеальное (теоретическое) соотношение, связывающее сигналы на его входе и выходе. Оно бы соответствовало реальному соотношению, если бы была возможность идеально спроектировать датчик, изготовить его из идеальных материалов идеальными инструментами и идеальными работниками. Это идеальное соотношение $S = f(s)$ называют *передаточной функцией*. Она может быть как линейной, так и нелинейной (например, степенной или экспоненциальной). Зачастую передаточная функция является одномерной (т. е. связывает выходной сигнал только с одним внешним воздействием). Одномерная линейная функция может быть представлена выражением вида:

$$S = a + bs, \quad (9)$$

где a – значение выходного сигнала при нулевом входном, b – наклон прямой, называемый чувствительностью датчика. Для нелинейных передаточных функций чувствительность не является постоянной, как в случае линейных функций. Однако во многих случаях нелинейные датчики можно считать линейными внутри некоторого ограниченного диапазона значений. Тогда для более широкого диапазона значений передаточная функция может быть представлена в виде отрезков прямых (т. е. кусочно-линейная аппроксимация) с разным значением b . В случаях, когда выходной сигнал датчика зависит от нескольких видов внешних воздей-

ствий, его передаточная функция является многомерной (например, инфракрасный датчик температуры). Как правило, передаточные функции представляются в виде зависимости «выход от входа» (9), однако когда датчик используется для количественного определения величины внешнего воздействия, необходимо получить зависимость вида $s = g(S)$ («вход от выхода»). При линейной передаточной функции это не представляет особых сложностей, в случае же присутствия в системе нелинейности, задача усложняется. Во многих случаях не удается получить пригодного аналитического выражения, тогда применяют различные методы аппроксимации.

Диапазон измеряемых (входных) значений – динамический диапазон внешних воздействия, которые датчик может воспринять и преобразовать, не выходя за пределы допустимых погрешностей. Для датчиков с очень широкой и нелинейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) динамический диапазон входных значений выражается в децибелах, являющихся логарифмической мерой отношений мощностей или напряжений. Поскольку логарифмическая шкала является нелинейной, сигналы низкого уровня представляются на ней с большим разрешением, сигналы же большого уровня сжимаются, что на практике бывает весьма удобно.

Диапазон выходных значений – алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальной и минимальной величине внешнего воздействия. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции.

Точность датчика указывает на погрешность измерений, т. е. величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков. Погрешность датчика можно также представить в виде разности между значением входного сигнала, вычисленным по выходному сигналу датчика, и реальным значением поданного сигнала. Реальная передаточная функция никогда не совпадает с идеальной. Даже когда датчики изготавливаются в идентичных условиях, из-за разницы в материалах, ошибок разработчиков и многих других причин их передаточные функции будут отличаться друг от друга. Однако все они не должны выходить за пределы определенной зоны, лежащей в границах предельно допустимых погрешностей $\pm \Delta$. На точность датчиков влияют такие характеристики как наличие гистерезиса, мертвая зона, параметры калибровки, воспроизводимость. Предельно допустимые погрешности обычно соответствуют самым худшим рабочим характеристикам датчиков. На практике пределы допустимых погрешностей устанавливают не вокруг идеальной передаточной функции, а относительно калибровочной кри-

вой. Допустимые пределы становятся меньше, если они не включают в себя погрешности, связанные с отличием датчиков от партии к партии, либо когда они относятся к одному специально откалиброванному датчику. Все это, конечно, повышает точность измерений, однако и значительно повышает стоимость, что не всегда целесообразно. Погрешности датчиков могут быть представлены в видах:

- Непосредственно в единицах измеряемой величины (Δ);
- В процентах от значения максимального входного сигнала;
- В единицах выходного сигнала.

В современных датчиках точность часто характеризуется величиной статистической погрешности измерений, учитывающей влияние как систематических, так и случайных погрешностей, и не зависящей от ошибок, допущенных при определении передаточных функций.

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании. Типичной причиной возникновения гистерезиса является трение и структурные особенности или изменения материалов.

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых можно аппроксимировать прямой линией в соответствии с (9). Под нелинейностью понимают максимальное отклонение реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой. При проведении нескольких циклов калибровки выбирается худшее из полученных значений нелинейности в качестве характеристики датчика. Нелинейность обычно выражается в процентах от максимальной величины входного сигнала, либо в единицах измеряемой величины. В зависимости от способа проведения аппроксимирующей линии различают несколько способов линеаризации. Один из них – проведение прямой через конечные точки передаточной функции. При таком способе ошибка нелинейности минимальна в конечных точках и максимальна в промежутке между ними. Другой способ линеаризации основан на методе наименьших квадратов. Для этого в широком диапазоне измеряемых значений (лучше в полном) для ряда значений (n) внешних воздействий s определяют значения выходных сигналов S . После этого применяют формулу линейной регрессии и определяют значения коэффициентов a и b в (9). Еще один метод – независимой линеаризации – заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными как можно ближе друг к другу, но охватывающими при этом все выходные значения реальной передаточной функции. В зависимости от метода линеаризации аппроксимирующие линии будут иметь разные

коэффициенты a и b , а следовательно, значения нелинейности, полученные разными способами, могут существенно отличаться друг от друга.

Каждый датчик имеет свои пределы рабочих характеристик. Даже если он считается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал может стать нелинейным, т. е. перестанет отвечать приведенной линейной зависимости. В этом случае говорят, что датчик вошел в зону нелинейности, или в зону насыщения.

Если производственные допуски на датчик и допуски на интерфейс (схемы преобразования сигналов) превышают требуемую точность системы, необходимо проводить *калибровку*, т.е. определить индивидуальную передаточную функцию датчика, либо системы в целом. В процессе проведения полной калибровки определяют коэффициенты, описывающие передаточную функцию всей системы в целом, включая датчик, интерфейсное устройство и АЦП. Математическое описание передаточной функции необходимо знать до начала проведения калибровки. Если это выражение является линейным, в процессе калибровки необходимо определить коэффициенты a и b . Для нахождения их необходимо получить два уравнения, т.е. калибровка проводится как минимум по двум точкам. Для нелинейных функций калибровка проводится по более, чем двум точкам. Количество необходимых точек и циклов калибровки определяется с учетом вида математического выражения передаточной функции, а также требуемой точности системы. Для проведения калибровки датчиков важно иметь точные физические эталоны, позволяющие моделировать соответствующие внешние воздействия. Точность последующих измерений с помощью датчиков или систем напрямую зависит от точности проведения калибровки. Ошибка калибровочных эталонов должна включаться в полную ошибку измерений. *Ошибка калибровки* – это погрешность, допущенная производителем при проведении калибровки датчика (системы). Эта погрешность носит систематический характер, т. е. добавляется ко всем реальным передаточным функциям. Ошибка калибровки сдвигает характеристику преобразования датчика в каждой точке на определенную величину. Она может быть неравномерной во всем диапазоне измерений, может зависеть от типа ошибки, допущенной в процессе калибровки.

Воспроизводимость – это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Воспроизводимость результатов определяется по максимальной разности выходных значений датчика, полученных в двух циклах калибровки. Обычно она выражается в процентах от максимального значения входного сигнала.

Причинами плохой воспроизводимости результатов могут быть тепловой шум, поверхностные заряды, пластичность материалов и другие.

Мертвая зона – это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов. В пределах этой зоны выходной сигнал датчика остается практически постоянным, часто равным нулю.

Разрешающая способность – это величина минимального изменения входного сигнала, приводящая к появлению минимального изменения выходного сигнала датчика при определенных условиях. Иногда разрешающая способность определяется в процентах от полной шкалы (максимального значения входного сигнала). Разрешающая способность датчиков с цифровыми выходными сигналами часто задается числом бит слова данных. Например, в описании может быть приведена информация, что разрешение датчика равно 8 бит. Отсюда можно получить либо полный диапазон входных сигналов, либо оценить величину младшего значащего разряда.

Выходной импеданс $Z_{\text{вых}}$ является характеристикой, указывающей, насколько легко датчик согласовывается с последующей электронной схемой. Если выходным сигналом датчика является напряжение, то сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключают параллельно входному сопротивлению (импедансу) электронной схемы $Z_{\text{вх}}$. Если же выходным сигналом датчика является электрический ток, то сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключают последовательно входному сопротивлению (импедансу) электронной схемы $Z_{\text{вх}}$ (рис. 22). Обычно входной и выходной импедансы представляют в комплексном виде, поскольку они включают в себя и активные и реактивные компоненты. Для минимизации искажений выходного сигнала датчик с токовым выходом должен иметь максимально возможный выходной, а его интерфейсная схема – минимальный входной импеданс. В случае потенциального соединения (выходной сигнал датчика – напряжение) датчик должен иметь низкий выходной импеданс, а его интерфейсная схема – высокий входной.

Сигнал возбуждения – это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Он описывается интервалом значений напряжения или тока. Для некоторых типов датчиков также указывается частота сигнала возбуждения и его стабильность. Выход параметров сигнала возбуждения за указанные пределы может привести к изменению передаточной функции датчика, а, следовательно, к искажению выходного сигнала.

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровоч-

ными коэффициентами и т. д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда с достаточной точностью отслеживает изменения внешнего сигнала. Т. е. любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми динамическими характеристиками. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения величины внешних воздействий, отличные от реальных в данный момент времени, иначе говоря, работать с динамической погрешностью. Если датчик входит в измерительную систему, обладающую определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, в худшем же случае – к возникновению колебаний в системе.

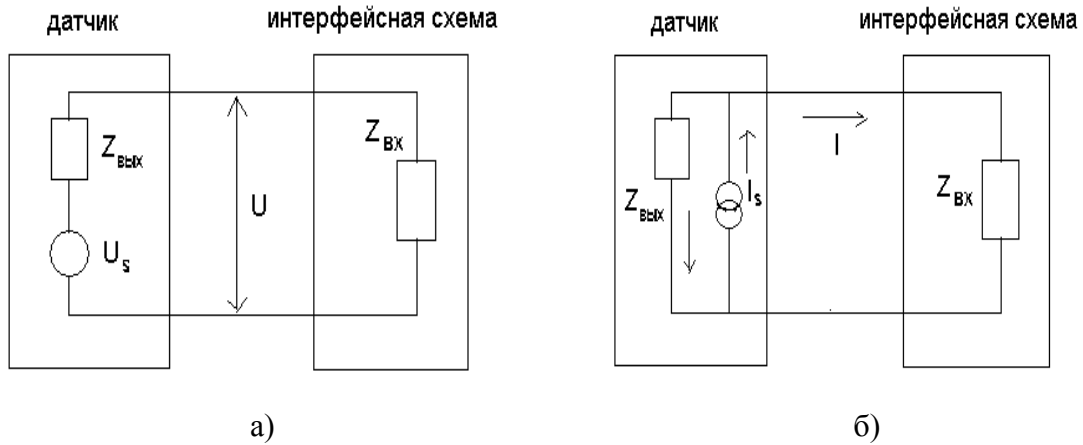


Рис. 23. Соединение датчика с интерфейсной схемой: а) датчик с выходным сигналом в виде напряжения, б) датчик с токовым выходом

В теории автоматического управления принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройств в виде линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При решении таких уравнений можно определить динамические характеристики устройства. В зависимости от конструкций датчиков уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок. Например, дифференциальные уравнения *первого порядка* описывают поведение датчиков, в состав которых входит один энергопреобразующий элемент (например, датчик температуры, в котором теплота преобразуется в электрический сигнал). В качестве динамических характеристик таких датчиков обычно указываются их *частотные характеристики*, показывающие, насколько быстро датчик может отреагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображе-

ния относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывающая, на какой частоте происходит 30% уменьшение величины выходного напряжения или тока. Эта граничная частота называется верхней частотой среза и считается предельной частотой работы датчика.

Частотные характеристики напрямую связаны с *быстродействием* датчика, которое выражается в единицах внешнего воздействия на единицу времени. То, какие именно характеристики, АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчиков. Другой способ описания быстродействия состоит в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня в 90 % от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Еще один способ – определение постоянной времени τ датчика. Например, в терминах электрических величин $\tau = C \cdot R$, где C – емкость, R – сопротивление системы. В тепловых терминах под C и R понимается теплоемкость и тепловое сопротивление. Постоянная времени является мерой инертности датчика. Для системы первого порядка временная зависимость имеет вид:

$$S = S_m(1 - e^{-t/\tau}), \quad (10)$$

где S_m – установившееся значение выходного сигнала, t – время. Заменяя в (10) t на τ получим:

$$\frac{S}{S_m} = 1 - e^{-1} = 0.6321, \quad (11)$$

т. е. по истечении времени, равного постоянной времени τ , входной сигнал системы (датчика) достигает уровня, составляющего около 63 % от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении трех постоянных времени уровень выходного сигнала составит 95 %.

Частота среза характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает, насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя – с каким самым медленным сигналом он может работать.

Фазовый сдвиг на определенной частоте показывает, насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия. Фазовый сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, необходимо знать его фазо-

вые характеристики, поскольку фазовый сдвиг датчика может снизить запас по фазе всей системы в целом и привести к возникновению неустойчивости.

Дифференциальные уравнения второго порядка описывают поведение датчиков с двумя энергопреобразующими элементами (например, акселерометр, в состав которого входит инертная масса и пружина). На выходах датчиков второго порядка при подаче на их входы некоторого ступенчатого воздействия практически всегда возникают колебания. Если эти колебания кратковременные, датчик считается демпфированным. Однако они могут длиться продолжительное время, либо постоянно. Это является признаком неправильной работы датчика, поэтому продолжительных колебаний необходимо избегать. Любой датчик второго порядка характеризуется *резонансной (собственной) частотой*, выражаемой в герцах или радианах в секунду. На собственной частоте происходит значительное увеличение значения выходного сигнала датчика. Обычно производители указывают значение собственной частоты датчика и его коэффициент затухания (демпфирования). *Демпфирование* – это значительное снижение или подавление колебаний в датчиках второго и более высоких порядков. От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже, либо выше собственной частоты датчика (на 60 % и более). Однако для некоторых типов датчиков именно резонансная частота является рабочей.

Время разогрева также является одной из динамических характеристик датчиков. Это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева, однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах, например), для своего разогрева требуют время от нескольких секунд до нескольких минут.

Для некоторых датчиков необходимо указывать *специальные характеристики входных сигналов*, каковыми могут быть, например, спектральные характеристики детекторов освещенности в пределах определенной оптической полосы.

На характеристики датчиков влияют и факторы окружающей среды, что необходимо учитывать как при работе с датчиками и системами, так и при их хранении и транспортировке. *Условия хранения* – совокупность предельных значений факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение определенного промежутка времени, при которых не

происходит существенного изменения его рабочих характеристик и обеспечивается поддержание его работоспособности. Обычно условиями хранения устанавливаются максимальная и минимальная температуры хранения, а также максимальная относительная влажность при этих температурах. В зависимости от физической природы датчика могут указываться и дополнительные условия хранения – максимальное давление, присутствие или отсутствие некоторых газов или паров, например. *Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф)* – характеристики точности датчиков, описывающие изменения рабочих характеристик датчиков в течение коротких (минуты, часы, дни) или длинных (до нескольких лет) промежутков времени. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться с течением времени, что можно выразить через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов старения, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов, из которых изготовлен датчик. Долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для высокоточных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от воздействий окружающей среды, какие материалы использовались при их изготовлении. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят органические компоненты (например, эпоксидная смола). Для повышения долговременной стабильности датчики подвергают термоциклической обработке, моделирующей экстремальные условия работы. Кроме повышения стабильности характеристик датчика, такая обработка позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств. Необходимо отметить, что в перечень условий окружающей среды, воздействующих на датчик при хранении, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную природу, т. е. они влияют на передаточную функцию датчика. Например, чувствительность резистивного датчика напряжений увеличивается с ростом температуры окружающей среды. Очень важным требованием для современных датчиков является обеспечение их стабильной работы в разнообразных условиях окружающей среды. Поэтому не только разработчики, но также и экспериментаторы должны максимально возможно учитывать все внешние воздействия, способные повлиять на рабочие характеристики датчиков. Даже если производитель устройства не указал влияющие факторы (например, возможность появления паразитных выходных сигналов при вибрации соединительных проводов или резком изме-

нении температуры окружающей среды), разработчик или экспериментатор должны проверить работу устройства в конкретных условиях эксплуатации, и в случае реального ухудшения рабочих характеристик принять необходимые меры. Например, поместить датчик в защитный корпус или использовать электро- или теплозащитный экран.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков. Рабочий диапазон температур – это интервал окружающих температур, внутри которого датчик работает с заданной точностью. Необходимо учитывать, что передаточные функции датчиков сильно зависят от температуры окружающей среды. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков встраивают специальные компенсационные элементы, либо включают компенсационные схемы в схемы преобразователей сигналов от датчиков.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагреваемых от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Это особенно существенно при работе термодатчиков. Степень саморазогрева датчика зависит от его конструктивных особенностей и от условий окружающей среды. Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры. Самый сильный саморазогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для оценки погрешности саморазогрева разработчиками используется следующая формула:

$$\Delta T^o = \frac{U^2}{(\rho Vc + \alpha) \cdot R},$$

где ρ – плотность массы датчика, c – удельная теплоемкость, V – объем датчика, α – коэффициент теплопроводности, описывающий взаимосвязь датчика с внешней средой, R – электрическое сопротивление датчика, U – эффективное напряжение на сопротивлении. Из приведенной формулы видно, что для уменьшения погрешности саморазогрева необходимо увеличивать коэффициент α , т. е. обеспечивать плотный контакт датчика с объектом измерений при одновременном увеличении площади контакта, для чего можно применять теплопроводные смазочные или адгезионные вещества. Кроме того, предпочтительнее использовать высокоомные датчики и датчики с низким рабочим напряжением.

Надежность – это способность датчика выполнять требуемые функции при соблюдении определенных условий в течение заданного промежутка времени. В статистических терминах это вероятность того, что устройство будет работать без поломок в течение указанного промежутка времени или заданного количества циклов. Общепринятые спосо-

бы измерения надежности отсутствуют, поэтому производители очень редко указывают ее в перечне характеристик датчиков.

Для возможности применения датчиков в различных областях важными могут быть и такие характеристики датчиков, как *вес, конструкция, габариты*. Если для датчиков главными параметрами являются точность и надежность, такая характеристика, как *стоимость*, не играет ведущей роли. Если устройства предназначены для систем жизнеобеспечения, оборонных комплексов, космических кораблей, их высокая стоимость оправдана предъявляемыми требованиями по точности и надежности. Существует целый ряд других областей применения датчиков, где их стоимость является основополагающей.

В общем случае, перед тем как приступить к разработке или выбору детектора (датчика), необходимо ответить на ряд вопросов, например, следующий:

- Величина и тип измеряемых величин
- Требуемая точность и разрешающая способность
- Материал, из которого изготовлен, или состоит объект (металл, пластмасса, жидкость, ферромагнетик, биологическая ткань и пр.)
- Диапазон измерений
- Условия окружающей среды, в которых должен работать датчик
- Потребляемая мощность датчика
- Размер пространства, отведенный под монтаж датчика
- Срок службы датчика
- Количество датчиков, которое необходимо изготовить и стоимость одного устройства

я

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров Н. Г. «Метрология: основные понятия и математические модели» М. Высшая школа 2002 г.
2. Тартаковский Д. Ф. «Метрология, стандартизация и технические средства измерения» Учебник для ВУЗов М. Высшая школа 2001 г.
3. П. В. Новицкий, И. А. Зограф «Оценка погрешностей результатов измерений» - Л.: Энергоатомиздат, 1985 г. – 248 с.
4. Дж. Фрайден «Современные датчики. Справочник» М.: Техносфера, 2006 г. – 529 с. ISBN 5-94836-050-4
5. Клаассен Клаас Б. «Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике» М. 2002
6. М. К. Ефимчик «Технические средства электронных систем. Вводный курс» Мн.: Тесей, 2000. – 276 с.
7. Крылова Г. Д. «Основы стандартизации, сертификации, метрологии» М. Юнити 2000.
8. Гольцман Ф. Н. «Вопросы статистической обработки измерений» СПб 2000
9. «Метрология и радиоизмерения» под ред. Нефедова В. М. М. Высшая школа 2003 г., 526 С.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. МЕТРОЛОГИЯ И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ | 5 |
| 2. ИЗМЕРЕНИЯ. ЭТАЛОНЫ | 13 |
| 3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ | 17 |
| 4. ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ. ПРАВИЛА И ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗМЕРЕНИЙ | 33 |
| 5. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ | 40 |
| 6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА | 47 |
| 7. ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ | 49 |
| 8. ДАТЧИКИ. КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ | 79 |
| ЛИТЕРАТУРА | 98 |