МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ и науки
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
В г. ТАГАНРОГЕ

С.И. Клевцов

ПРИНЦИПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДАТЧИКАХ СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Часть 1

Учебное пособие

Работа выполнена на кафедре "Микропроцессорные системы"
ТТИ ЮФУ при реализации приоритетного национального
проекта "Образование"

Таганрог 2007

УДК 681.323

Клевцов С.И. Принципы преобразования физических сигналов в датчиках систем сбора и обработки информации. Часть 1: Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. - 96с.

Работа выполнена в рамках приоритетного национального проекта "Образование" на кафедре "Микропроцессорные системы" ТТИ ЮФУ.

Учебное пособие посвящено изучению основных физических принципов преобразования сигналов и их использования в датчиках физических величин систем мониторинга и управления техническими объектами и технологическими процессами.

Подробно рассмотрены вопросы терминологии, структурного построения датчика, классификация датчиков, которые могут быть подключены к измерительной системе при помощи электрических проводов.

Рассмотрены особенности использования емкости, сопротивления, эффектов Холла, Зеебека, Пельтье, звуковых волн и других для измерения значений параметров давления, перемещения, скорости, ускорения? магнитного поля и других характеристик объектов окружающего нас мира.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и безотрывной форм обучения специальностей 230201 «Информационные системы и технологии» и 210106 «Промышленная электроника».

Табл. 3 Ил. 36. Библиогр.: 21 назв.

ISBN

© Технологический институт Южного федерального университета, 2007

© Клевцов С.И., 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

1. **Основные сведения о датчиках** 5

1.1. Основные понятия 5

1.2. Датчик как векторное пространство 14

1.3. Обобщенная структура датчика 15

2. Классификация датчиков 21

2.1. Классификация датчиков в зависимости от структуры его физической модели и модели взаимодействия со средой 21

2.2. Классификация датчиков в зависимости от особенностей функционирования и по квалификационным признакам 25

2.3. Определение датчика 32

2.4. Единицы измерения 33

3. Физические явления, используемые при измерении физических сигналов в датчиках 36

3.1. Использование емкости 36

3.2. Использование сопротивления в датчиках 45

3.3. Пьезоэлектрический эффект 54

3.4. Пироэлектрический эффект 65

3.5. Эффект Холла 75

3.6. Использование звуковых волн 79

3.7. Эффекты Зеебека и Пельтье 82

Список использованных источников 96

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий нас мир можно разделить на две части: природа и объекты, созданные человеком. Естественные сенсоры, которыми снабжен любой живой организм, обычно реагируют на электрохимические сигналы, т.е. их физический принцип действия основывается на передаче ионов в нервных тканях. В системах же, созданных людьми, в передаче сигналов участвуют электроны. Язык общения здесь — электрические сигналы, в которых информация, передается при помощи электронов, а не ионов. Правда, следует отметить, что в оптических системах связи информация передается через фотоны.

В данном учебном пособии будут рассматриваться физические принципы преобразования сигналов и датчики, которые могут быть подключены к измерительной системе при помощи электрических проводов.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ

1.1. Основные понятия

Одним из важнейших для измерений понятий является понятие **измерительного преобразования.**

Измерением является познавательный процесс получения количественной информации об объекте, которым может служить предмет, физическая система, явление и т.д.

Объект измерения должен обладать одним или совокупностью характеризующих его свойств, представляющих интерес для получателя количественной информации.

Одно из таких свойств физического объекта (в дальнейшем объект), общее в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них, называется **физической величиной** (или просто **величиной**).

Физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с поставленной задачей, именуется **измеряемой физической величиной** (или просто **измеряемой величиной**) [1].

Для количественного выражения каждой измеряемой величины служит соответствующая единица измерения, т.е. такая же физическая величина, но которой присвоено числовое значение, равное единице.

Число подлежащих измерению механических, тепловых, оптических, акустических и пр. так называемых неэлектрических величин, интересующих науку и производство, в настоящее время во много раз превышает число всех возможных электрических и магнитных величин.

Измерения осуществляются специально предназначенными для этих целей техническими средствами, именуемыми средствами измерительной техники, причем основная «измерительная нагрузка» ложится на средство измерений, т.е. на техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормируемые метрологические характеристики, под которыми подразумеваются устанавливаемые нормативно-техническими до-

кументами свойства средства измерений, влияющие на получаемый результат и его достоверность.

Эти же свойства, определяемые экспериментально, именуются **действительными метрологическими характеристиками**.

Чаще всего в инженерной практике нам приходится иметь дело с таким средством измерений, как измерительный прибор. Существует огромное количество разнообразных приборов для измерений и электрических, и неэлектрических величин, такие как термометры, весы, амперметры, вольтметры, счетчики электрической энергии, часы и даже хронометры.

Измерительный прибор тем или иным способом **воспринимает** измеряемую величину, В результате мы получаем отображенное в доступной нам форме (отсчет по шкале, цифры на дисплее, диаграмма на ленте самопишущего прибора и пр.) значение измеряемой величины. В течении этого процесса имеют место одно или несколько **измерительных преобразований, когда входная измеряемая величина** на входе прибора **преобразовывается** в **выходную величину** на выходе.

При этом очень важно отметить, что по мере нашего продвижения со входа на выход измерительного прибора преобразования одной физической величины в другую сопровождаются соответствующими преобразованиями энергии, определяющими принцип действия данного средства измерений. Однако энергетические преобразования - неизбежная дань, которую приходится платить за получение количественной информации об объекте измерения. Поток энергии сквозь измерительный прибор - это лишь переносчик **измерительного сигнала,** содержащего количественную информацию об измеряемой физической величине. Очевидно, что при взаимодействии средства измерений с объектом измерений следует соблюдать принцип «не навреди чистоте эксперимента!» Это означает, что входная часть нашего измерительного прибора должна минимально воздействовать на измеряемый объект. В идеальном случае это означало бы отсутствие отбора энергии от объекта, но это физически нереализуемо. Поэтому надо стараться по возможности не вмешиваться входной частью средства измерений в среду объекта измерения.

Таким образом, для получения количественной информации об объекте измерения нужно выбрать наиболее подходящую физическую величину, являющуюся интересующим нас свойством этого объекта, определиться с требуемым средством измерений и озаботиться хорошо продуманной «стыковкой» входной части прибора с объектом измерений с учетом вышеупомянутого принципа. При соблюдении этих условий мы приобретаем уверенность в том, что физическая величина путем одного или нескольких измерительных преобразований с помощью передаваемого с входа на выход измерительного сигнала отобразится в виде результата измерений, именуемого **значением физической величины.**

Все относительно просто, пока измеряется одна величина, практически не меняющаяся в процессе измерения, да еще, если необходима информация о свойстве объекта лишь в одной точке или в ее окрестности. А как быть, если нужно одновременно во многих, разнесенных точках пространства измерять совокупность разных физических величин, причем непосредственный доступ к объекту измерения экспериментатору не разрешен (например, доменная печь или атомный реактор), да и сами физические величины достаточно быстро изменяются в ходе выполнения эксперимента?

В этих случаях средствами измерений служат уже **измерительные системы** (а не приборы), представляющие собой совокупности функционально объединенных средств измерений и других технических средств, размещенных в разных точках объекта измерения, а часто, кроме того, удаленных друг от друга на значительные расстояния, что приводит к необходимости использования каналов связи (или передачи информации) между ними.

Именно здесь уместно познакомиться с двумя понятиями, которые окажутся весьма полезными в дальнейшем [1, 2]:

- совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода, называется **измерительной цепью;**
- измерительная цепь измерительной системы называется **измерительным каналом.**

От объекта измерений как источника информации к экспериментатору как к пользователю этой информации выполняется ряд преобразований, формирующих процесс измерений, а используемое средство измерений (или их совокупность) состоит из цепочки (измерительной цепи) **измерительных преобразователей,** один из которых, непосредственно связанный с объектом измерения, называется **первичным измерительным преобразователем.**

Таким образом [1, 2, 3, 4]:

• техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками (т.е. тоже являющееся одной из разновидностей средств измерений), служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи, называется **измерительным преобразователем (ИП);**

• измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи (канала) средства измерений, называется **первичным измерительным преобразователем или просто первичным преобразователем (ПП).**

Функционирование ИП базируется на использовании различных физических эффектов и явлений, а также вариантах их конструктивного исполнения.

В частности, ПП могут быть встроены в измерительный прибор или измерительное устройство, а также конструктивно обособлены. В последнем случае такой ПП является составной частью прибора, который называется **датчиком.**

Датчики получили широкое распространение не только в средствах измерений, но и в устройствах управления, сигнализации, охраны, обнаружения различных объектов.

В основном датчики - элементы измерительной техники, имеющие гарантированные, сохраняющиеся в течение определенного интервала времени метрологические характеристики.

Отметим, что датчик не только «дает» информацию, но и воспринимает измеряемую (входную) физическую величину от объекта измерения, играя при этом роль своеобразного «приемопередатчика».

Следовательно, в датчике реализуются **три процесса [1]:**

- ***восприятие входной физической величины,***
- ***ее преобразование в промежуточную (или же сразу же в выходную) величину той же или иной физической природы,***
- ***формирование измерительного сигнала, передаваемого вдоль измерительной цепи, сопрягаемой с датчиком.***

Таким образом, ***датчик — это устройство, воспринимающее внешние воздействия (измеряемую величину) и реагирующее на них изменением электрических сигналов.***

Под термином ***внешнее воздействие*** понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которые необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал. Термин ***измеряемая величина,*** имеет аналогичное значение, однако в этом термине делается акцент на количественной характеристике сенсорной функции.

Назначение датчиков — реакция на определенное внешнее физическое воздействие и преобразование его в электрический сигнал, совместимый с измерительными схемами. Другими словами, можно сказать, что датчик — это преобразователь физической величины (часто неэлектрической) в электрический сигнал. Под термином *электрический сигнал* понимается сигнал, который может быть преобразован при помощи электронных устройств, например, усилен или передан по линии передач. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, фазой или цифровым кодом. Этот набор характеристик называется *форматом выходного сигнала.* Таким образом, каждый датчик характеризуется набором входных параметров (любой физической природы) и набором выходных электрически параметров.

Любой датчик является преобразователем энергии. Вне зависимости от типа измеряемой величины всегда происходит передача энергии от исследуемого объекта к датчику. Работа датчика - это особый случай передачи информации, а любая пе-

редача информации связана с передачей энергии. Очевидным является тот факт, что передача энергии может проходить в двух направлениях, т.е. она может быть как положительной, так и отрицательной, например, энергия может передаваться от объекта к датчику, и, наоборот, от датчика к объекту. Особым случаем является ситуация, при которой энергия равна нулю, но и в этом случае происходит передача информации о существовании именно такой особой ситуации. Например, инфракрасный датчик температуры вырабатывает положительное напряжение, когда объект теплее датчика (инфракрасное излучение направлено в сторону датчика), или отрицательное напряжение, когда объект холоднее датчика (инфракрасное излучение направлено от датчика на объект). Когда датчик и объект имеют одинаковую температуру, инфракрасный поток равен нулю, и выходное напряжение также равно нулю. В этой ситуации и заключена информация о равенстве температур датчика и объекта.

Понятие ***датчик*** необходимо отличать от понятия ***преобразователь.***

Преобразователь конвертирует один тип энергии в другой, тогда как датчик преобразует любой тип энергии внешнего воздействия в электрический сигнал.

Примером преобразователя может служить громкоговоритель, конвертирующий электрический сигнал в переменное магнитное поле для последующего формирования акустических волн.

Датчик может состоять из нескольких преобразователей, как на рисунке 1.1.

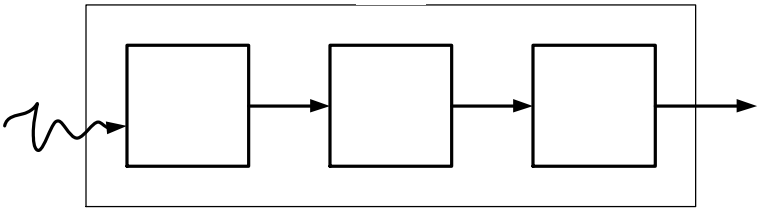

Рисунок 1.1. - Датчик, состоящий из нескольких преобразователей (e_1 , e_2,...~ различные виды энергии).

Например, в состав химического датчика могут входить два преобразователя, один из которых конвертирует энергию химических реакций в тепло, а другой, термоэлемент, преобразовывает полученное тепло в электрический сигнал. Комбинация этих двух преобразователей представляет собой химический датчик — устройство, вырабатывающее электрический сигнал в ответ на химическую реакцию. Отметим, что в рассмотренном примере химический датчик является составным датчиком, состоящим из преобразователя и еще одного датчика - датчика температуры.

В структуру составных датчиков, как правило, входит хотя бы один датчик прямого действия и несколько *преобразователей.*

Датчиками прямого действия называют датчики, которые построены на физических явлениях, позволяющих проводить непосредственное преобразование энергии внешнего воздействия в электрические сигналы. Примерами таких физических явлений являются фотоэффект и эффект Зеебека.

На практике датчики не работают сами по себе. Как правило, они входят в состав измерительных систем, часто довольно больших, объединяющих много разных детекторов, преобразователей сигналов, сигнальных процессоров, запоминающих устройств и приводов. Датчики в таких системах могут быть как наружными, так и встроенными. Часто их располагают на входах измерительных приборов для того, чтобы они реагировали на внешние воздействия и сообщали системе об изменениях в окружающих условиях. Также они размещаются внутри измерительных систем для мониторинга их функционирования, что необходимо для поддержания корректной работы всех внутренних устройств. Датчики являются неотъемлемой частью систем сбора данных, которые, в свою очередь, могут входить в состав больших измерительных комплексов со множеством обратных связей.

На рисунке 1.2 показана блок-схема автоматизированного измерительного комплекса, состоящего из системы сбора данных и управляющего устройства [5].

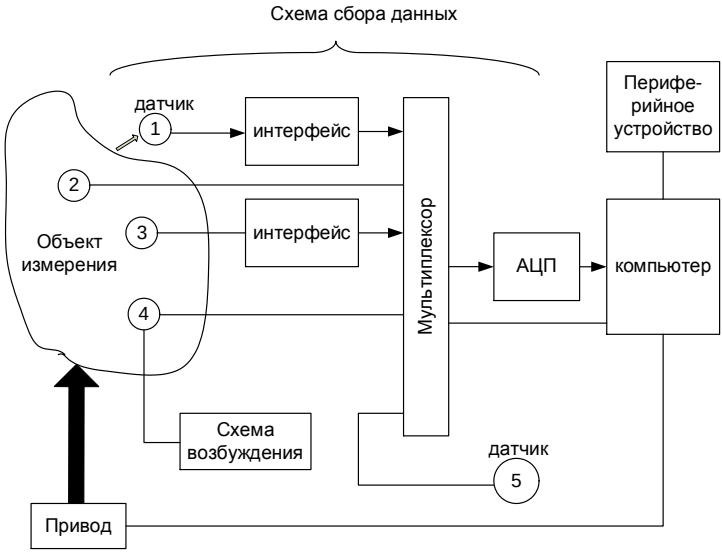

Рисунок 1.2. - Структура автоматизированного измерительного комплекса

Из этого рисунка хорошо видна роль датчиков в таких системах. Субъектами измерений могут быть любые материальные объекты: автомобили, космические корабли, человеческие тела, различные жидкости и газы. Данные об измеряемом объекте собираются при помощи датчиков, часть из которых, (2, 3 и 4), располагается на поверхности или внутри объекта. Датчик 1 не имеет непосредственной связи с объектом, т.е. является *бесконтактным.* Телевизионные камеры и детекторы излучений служат примерами таких датчиков. Даже когда датчик называется бесконтактным, всегда между ним и объектом происходит передача энергии.

Датчик 5 может выполнять различные функции. Часто он служит для контроля за условиями внутри самой системы сбора данных. Датчики 1 и 3 не могут быть напрямую подсоединены к стандартным электронным схемам из-за несоответствия форматов выходных сигналов. Для их подключения требуются специальные интерфейсные устройства - преобразователи сигналов. Датчики 1, 2, 3 и 5 являются пассивными, поскольку для формирования выходных сигналов им не требуется дополнительная электрическая энергия. Датчик 4 - представитель активных устройств. Для обеспечения его работы необходим вспомогательный сигнал, получаемый от схемы возбуждения. При этом датчик модулирует этот сигнал в соответствии с изменением измеряемого параметра. Примером активных датчиков является температурно-чувствительный резистор, который часто называется термистором. Такой датчик работает от источника постоянного тока, являющегося в данном случае схемой возбуждения. Измерительный комплекс может включать в себя либо один датчик (домашний термостат), либо несколько тысяч (космический корабль).

Электрические сигналы с выходов датчиков поступают на мультиплексор, выполняющий роль переключателя. Если выходные сигналы датчиков являются аналоговыми, они поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), если цифровыми — непосредственно на компьютер, который синхронизирует работу мультиплексора и АЦП, а также посылает управляющие сигналы на привод, воздействующий непосредственно на объект. В качестве приводов могут использоваться электрические моторы, соленоиды, реле и пневматические клапаны. В состав измерительной системы также входят периферийные устройства (накопители данных, дисплеи, сигнализаторы и т.д.) и другие компоненты, не показанные в блок-схеме. Такими компонентами могут быть фильтры, схемы выборки и хранения, усилители и прочие преобразователи.

Входные сигналы датчиков (внешние воздействия) могут иметь практически любую физическую или химическую природу. Поток света, температура, давление, колебания, перемещение, положение, скорость, концентрация ионов - все это примеры внешних воздействий. Конструкция датчиков меняется в за-

висимости от их предназначения. Для особых условий применения может потребоваться разработка специальных корпусов и схем монтажа. Например, пьезорезистивный датчик для измерения кровяного давления внутри аорты монтируется в герметичном корпусе и имеет очень миниатюрные размеры для возможности прохождения через микрокатетер. Корпус того же самого датчика будет совсем другим для случая применения внутри надувной манжеты медицинского тонометра. Иногда от датчиков требуется чтобы они реагировали только на определенный диапазон входных сигналов. Например, детектор движения в охранной системе должен срабатывать только на перемещение людей и никак не реагировать на передвижение маленьких животных, таких как собаки и кошки.

1.2. Датчик как векторное пространство

Из вышесказанного ясно, что датчик, описываемый множеством параметров, может быть представлен в виде векторного пространства (рисунок 1.3). Однако он представляет интерес не сам по себе, а с учетом взаимодействия с объектом измерения и окружающей средой.

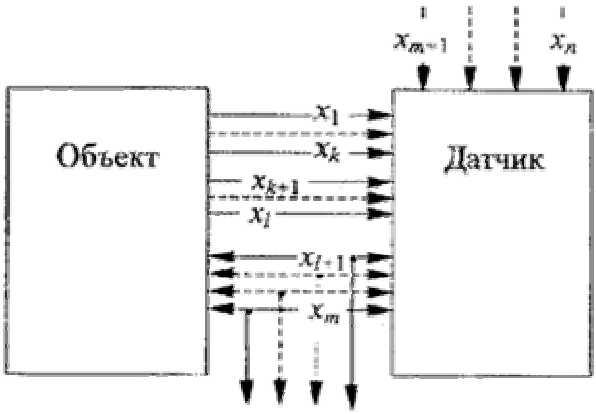

Рисунок 1.3 - Датчик как векторное пространство

На рисунке 1.3 приведено:

- $x_1 \sim x_k$ - измеряемые величины, которых в общем случае может быть не одна (комбинированные датчики);
- $x_{k+1} \sim x_l$ - неинформативные параметры объекта;
- $x_{l+1} \sim x_m$ - конструктивные параметры датчика;
- $x_{m+1} \sim x_n$ - влияющие факторы окружающей среды.

Все взаимодействия являются двунаправленными, т.е. датчик, с одной стороны, воспринимает воздействие измеряемой величины, неинформативных параметров объекта, факторов окружающей среды, а с другой - сам оказывает влияние на объект и окружающую среду.

Последнее чаще всего можно считать пренебрежимо малым, но не всегда. Так, неучет влияния на окружающую среду датчиков, являющихся источниками радиоактивного излучения, может дорого обойтись персоналу, работающему в непосредственной близости. Таким образом, датчик оказывается практически неотделим от объекта и окружающей среды и потому не может рассматриваться изолированно.

1.3. Обобщенная структура датчика

В принципе, датчики предназначаются для измерений параметров четырех агрегатных состояний вещества [1]:

- твердое тело (металлы, диэлектрики, полупроводники, композитные материалы);
- жидкости (криогенные, высококипящие, расплавленные металлы);
- газы (спокойные газы и газовые потоки при давлениях от глубокого вакуума до высоких давлений);
- плазма (низкотемпературная плотная плазма, высокотемпературная разреженная).

Измерениям подлежат физические параметры различных объектов и конструктивных элементов и их рабочих продуктов.

Измеряемые величины могут характеризоваться временными (стационарные, динамические, непрерывные, дискретные), пространственными (сосредоточенные, распределенные), корреляционными (независимые, зависимые) свойствами.

Априорные сведения об этих свойствах позволяют осуществить разработку новых датчиков и выбор существующих датчиков, определить места их установки, их количество на объекте измерения.

Преобладающее большинство датчиков являются *контактными*, т.е. они устанавливаются на объекте измерения в местах непосредственного измерения исследуемых параметров. Важнейшим фундаментальным фактом является то, что, как правило, это места концентрированного одновременного воздействия многих физических факторов. Датчик должен быть надежно защищен от разрушительного действия этих факторов (механическая надежность), а также должен обладать селективностью по отношению к измеряемому параметру и независимостью (в пределах допустимой погрешности) по отношению ко всем остальным факторам (метрологическая надежность).

Датчик, таким образом, представляет собою по существу многополюсник со многими входами и одним выходом. Разделение воздействий путем изучения функций влияния по каждому из дестабилизирующих факторов — дело неблагодарное и малореальное. Ведь для этого надо обладать еще и надежной информацией о всех влияющих факторах в местах установки основного датчика. В частных случаях такой путь возможен. Если измеряемым параметром является, допустим, давление, а превалирующим влияющим фактором является температура, то датчик целесообразно реализовать как двухпараметрический, и поправки на температуру могут быть сделаны вполне корректно.

Однако магистральный путь состоит в выборе таких принципов преобразования, которыми обеспечивается надежная селективность датчика к основному параметру. Промежуточным путем является автоматическая компенсаторная коррекция дестабилизирующих воздействий на датчик, которая, как правило, реализуется в виде частных и ограниченных по своим возможностям решений. К таким же путям может быть отнесено использование различных защитных мер от прямых воздействий влияющих факторов на датчик — разделительные трубопроводы и полости, волноводы, световоды, механические фильтры, теплозащитные прокладки и т.д.

Заметим, что все защитные меры являются одновременным источником систематических погрешностей датчиков при измерении основного параметра. В том числе и защита чувствительного элемента от прямого контакта с окружающей средой.

Процесс взаимодействия датчика с объектом измерений — это процесс обоюдный. Измерение корректно постольку, поскольку установка датчика на объект измерений не меняет физическую картину изучаемого процесса, не привносит каких-либо особенностей в поведение измеряемого параметра. Это условие необходимое, но не достаточное. Измерения также корректны постольку, поскольку датчик способен воспринять и правильно воспроизвести действительное поведение измеряемого параметра во времени.

Изложенные соображения приводят к совокупности требований к датчикам не только взаимопротиворечивых, но даже и взаимоисключающих. В этой связи разрешение этих противоречий при проектировании датчиков достигается назначением тех или иных целевых функций и решением оптимизационных задач, которые чаще всего строго аналитически не решаются.

Описанные в общем виде процессы взаимодействия датчика с объектом измерения и преобразования в нем измеряемой величины позволяют формализовать обобщенную структурную схему любого гипотетического датчика в следующем виде (рисунок 1.4).

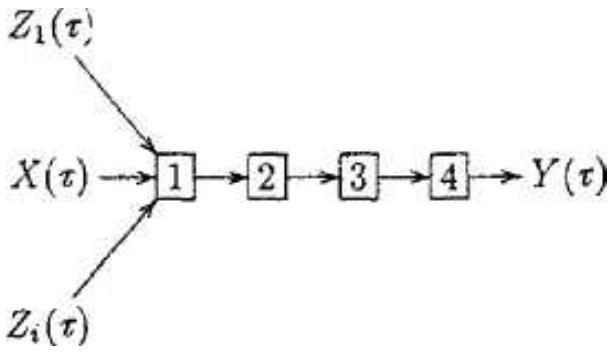

Рисунок 1.4 - Структурная схема датчика

На рисунке 1.4 приняты следующие обозначения:

- *1* — звено восприятия входного воздействия и одновременной защиты датчика;
- 2 — звено передачи входного воздействия к чувствительному элементу и одновременной защиты чувствительного элемента;
- *3* — чувствительный элемент — преобразователь измеряемой величины (уже преобразованной предыдущими звеньями) в электрический или электромагнитный параметр датчика;
- *4* — согласующее устройство (измерительная цепь) по необходимости входящее в состав датчика;
- *X(t)* — измеряемая величина (τ — время), входное воздействие;
- У (г) — выходная величина датчика;
- *Zi(t), ..., Zi(z)* — влияющие (дестабилизирующие) факторы

Смысл такой формализации заключается в единстве методологии рассмотрения разнотипных датчиков.

В конкретных реализациях датчиков те или иные звенья могут отсутствовать либо их функции могут быть выражены неявно. Вместе с тем может быть несколько звеньев одного и того же назначения, например звено *2*. Последовательность преобразований в каждом конкретном датчике всегда конкретна, но существенно то, что она укладывается в предлагаемую структурную схему.

Можно предвидеть, что согласию с предлагаемой структурной схемой могут помешать терминологические расхождения. Например, многие специалисты привыкли мембрану в датчиках давления называть (не без основания) чувствительным элементом. В предлагаемой схеме ей отводится роль звена *1*, Принципиальным должно быть согласие чувствительным элементом называть звено *3*. При этом никак не умаляется роль звена *1*, и оно может и часто выполняет ответственные метрологические функции.

Важно при этом подчеркнуть, что каждое звено осуществляет функцию преобразования, т.е. выполняет наряду с другими функциями функцию метрологическую и вносит свой вклад в точностные и динамические свойства датчика. Более того, вклад этот оказывается решающим в формировании погрешности результата измерений. Взаимоотношения между погрешностями датчика и погрешностями последующих звеньев информационной измерительной системы, в состав которой входит датчик, такие же как между природными дефектами и дефектами благоприобретенными и потому устранимыми. Устранение же природных дефектов — метрологических несовершенств датчика, возможно лишь с известными ограничениями, и дело это весьма непростое, требующее каких-либо жертв (точность за счет потери динамических свойств и наоборот, динамические свойства за счет прочности и надежности и т.д.). Диалектика преодоления этих противоречий требует ясности целей.

Приведем несколько иллюстраций.

- Датчик температуры жидкостного или газового потока. Чувствительный элемент — платиновая проволока, намотанная на тонкий слюдяной каркас (звено *5*). Чувствительный элемент помещен между двумя тонкими слюдяными обкладками (звено *2)*. Чувствительный элемент в обкладках помещен в плоскую обжатую трубку (звено *1),* устанавливаемую ребром по потоку. Звено *4* в датчике отсутствует,
- Датчик для измерений пульсаций давления. Давление воспринимается мембраной (звено *1)*. Прогиб (деформация) мембраны передается через упор (звено *2)* на пьезоэлектрический чувствительный элемент (звено *3)*. В датчике для согласования с внешней измерительной линией используется эмиттерный повторитель (звено *4)*.
- Датчик для измерения температуры спокойного газа в условиях естественной конвекции. Открытый чувствительный элемент (звено 3) из проволоки диаметром 30 мкм выполненный в виде бифилярной спирали, закрепленной концами петель в плоскости миниатюрной рамки. Других звеньев датчик не содержит.

Ему подобен волоконно-оптический датчик температуры на крутом изгибе. Чувствительный элемент датчика — волоконный световод с крутым изгибом — помещается непосредственно в измеряемую среду (звено *3).* Звенья *1* и *2* отсутствуют. Однако этот датчик имеет согласующее устройство (звено *4*) — светодиод и фотодиод.

Принципиальная возможность зависимости выходной величины датчика $Y(\tau)$ не только от входной измеряемой величины $X(\tau)$, но и от влияющих величин $Zi(\tau)$ привела к разделению функции преобразования датчика на «реальную» и «номинальную». Под «реальной» понимают функцию, отражающую комбинированную зависимость, а под «номинальной» — только зависимость $Y(\tau) = F[X(\tau)]$. Заметим, что «реальная» функция преобразования столь же неопределенна, сколь в общем случае неопределимы сами влияющие величины.

«Номинальная» же функция преобразования описывает тот процесс преобразования, ради которого датчик создавался.

Контрольные вопросы

1. Что такое измерительный преобразователь, измеряемая физическая величина, первичный преобразователь?
2. Перечислите основные процессы, которые реализуются в датчике.
3. Нарисуйте и опишите элементы структурной схемы датчика физических величин.
4. Что такое измерительная цепь, измерительный канал, измерительная система?
5. Опишите роль датчика в автоматизированном измерительном комплексе.
6. Опишите взаимодействие датчика с окружающей средой с позиции датчика как векторного пространства.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ

2.1. Классификация датчиков в зависимости от структуры его физической модели и модели взаимодействия со средой

Каждый датчик может и должен быть описан оператором, устанавливающим однозначную связь между его входной — $X(\tau)$ и выходной $Y(\tau)$ величинами. Этот оператор определяет как статические, так и динамические характеристики датчика.

Если оператор линеен (для него справедлив принцип суперпозиции), то такие датчики могут называться линейными.

В зависимости от структуры физической модели датчика и модели его взаимодействия со средой, датчики могут рассматриваться как с **сосредоточенными параметрами** (вход представим в виде точки), так и с **распределенными параметрами** (вход распределен по некоторой поверхности) [5, 6].

Соответственно датчики с сосредоточенными параметрами описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, а датчики с распределенными параметрами — уравнениями в частных производных или с помощью более сложных представлений.

Порядок уравнения определяет порядок датчика.

Датчик с сосредоточенными параметрами первого порядка апериодического типа

$$\frac{dY(\tau)}{d\tau} + aY(\tau) = bX(\tau),$$

где a и b — постоянные коэффициенты.

Таким образом описываются многочисленные датчики различных типов.

Датчик температуры с однородной структурой

$$\frac{dt_д(\tau)}{d\tau} + at_д(\tau) = at_и(\tau),$$

где t_a — температура датчика (однозначно определяющая его выходной параметр);

$a = \alpha S/(mc)$;

α — коэффициент конвективного теплообмена датчика со средой;
S — площадь измерительной поверхности датчика;
m — масса измерительной части датчика;
c — удельная теплоемкость материала датчика;
$t_И$ — измеряемая температура.

Крылъчатый анемометр — датчик измерения скорости потока

$$I\frac{d\omega(\tau)}{d\tau}+\mu\omega(\tau)=b\upsilon^2(\tau),$$

где I — момент инерции крыльчатки;
ω — угловая скорость вращения крыльчатки;
μ — коэффициент сил вязкого трения;
b — константа датчика;
υ — измеряемая скорость потока.

Датчик давления мембранного типа с разделительной полостью

$$a\frac{dP_Д(\tau)}{d\tau}+P_Д(\tau)=P(\tau),$$

где a — константа, определяемая объемом полости, коэффициентом динамической вязкости среды;
$P_д$ — давление в разделительной полости датчика;
P — измеряемое давление на входе в датчик.

Датчик с сосредоточенными параметрами второго порядка апериодического и колебательного типа

$$\frac{dY^2(\tau)}{d\tau^2}+c\frac{dY(\tau)}{d\tau}+aY(\tau)=bX(\tau).$$

Подавляющее большинство датчиков описывается именно таким типом уравнения.

Датчик температуры в защитной оболочке (неоднородная структура, чувствительный элемент изолирован от оболочки). Оболочка считается тонкой, однородной, и в ней отсутствуют градиенты температуры. В этом случае

$$\frac{d^2t_д(\tau)}{d\tau^2}+c\frac{dt_д(\tau)}{d\tau}+at_д(\tau)=bt_и(\tau).$$

где

$$c = \lambda \left(\frac{S_э}{c_э} + \frac{S_э}{c_о} \right) + \alpha_о \frac{S_о}{c_о};$$

λ — коэффициент теплопроводности промежутка между чувствительным элементом и оболочкой;
$S_э$ и $S_о$ — площади поверхности ЧЭ и оболочки;
$c_э$ и $c_о$ — полные теплоемкости ЧЭ и оболочки;
$\alpha_о$ — коэффициент конвективного теплообмена оболочки со средой:

$$a = \lambda \frac{S_э}{c_э} \alpha_о \frac{S_о}{c_о}; \quad b = \alpha_о \frac{S_э}{c_о} \lambda \frac{S_э}{c_о}.$$

Датчик вибрационных ускорении

$$m \frac{d^2 X(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX(\tau)}{d\tau} + \sigma X(\tau) = ma(\tau),$$

где m — инерционная масса датчика;
k — коэффициент демпфирования датчика;
σ — жесткость упругого элемента;
a — измеряемое ускорение.

Датчик давления мембранного типа

$$m \frac{d^2 X_д(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX_д(\tau)}{d\tau} + \sigma X_д(\tau) = P_и(\tau),$$

где m — масса мембраны;
$X_Д$ — прогиб мембраны;
k — коэффициент демпфирования колебаний мембраны;
σ — жесткость мембраны;
$P_И$ — измеряемое давление.

Более полное и содержательное описание датчика может быть получено при его рассмотрении **как** системы с распределенными параметрами.

Датчики с распределенными параметрами

Датчик температуры любой сложной структуры

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{т}} \nabla^2 t(x, y, z, \tau),$$

граничное условие (на поверхности датчика):

$$\lambda \left. \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial n} \right|_S +$$

$$+\alpha \left[t(x, y, z, \tau) \big|_S - t_{\text{и}}(\tau) \right] = 0$$

(равенство подводимого и отводимого тепловых потоков на поверхности датчика — S),

где $a_{\text{т}}$ — коэффициент температуропроводности материала датчика;

λ — коэффициент теплопроводности материала датчика;

n — нормаль к поверхности датчика;

a — коэффициент конвективного теплообмена датчика со средой;

$t|_S$ — температура на поверхности датчика;

$t_{\text{и}}$ — измеряемая температура.

Датчик давления мембранного типа

$$E \left[\frac{\partial^2 X(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X(r, \tau)}{\partial r} \right] + P_{\text{и}}(\tau) =$$

$$= k \frac{\partial X(r, \tau)}{\partial \tau} + m_S \frac{\partial^2 X(r, \tau)}{\partial \tau^2},$$

граничное условие:

$$X(r, \tau) \big|_{r=R} = 0,$$

где E — упругий коэффициент материала мембраны;

X — прогиб мембраны;

r— текущий радиус мембраны;

k— коэффициент демпфирования мембраны;

m_S — погонная масса поверхности мембраны;

R — радиус мембраны.

Решение вышеприведенных уравнений с разной степенью приближения для различных структур датчиков позволяет для априорно известных условий использования создавать раз-

нообразные датчики с прогнозируемыми метрологическими характеристиками.

2.2. Классификация датчиков в зависимости от особенностей функционирования и по квалификационным признакам

Системы классификации датчиков могут быть очень разными: от очень простых до сложных. Критерий классификации всегда выбирается в зависимости от цели проведения классификации [1, 5].

Все датчики можно разделить на две группы:

- датчики прямого действия;
- составные датчики.

Датчики прямого действия преобразуют внешнее воздействие непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление, в то время как в составных датчиках, прежде чем получить электрический сигнал на выходе оконечного датчика прямого действия необходимо осуществить несколько преобразований энергии.

Также все датчики можно разделить на две категории:

- пассивные датчики;
- активные датчики.

Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии и в ответ на изменение внешнего воздействия на его выходе всегда появляется электрический сигнал. Это означает, что такой датчик преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал. Примерами пассивных датчиков являются термопары, фотодиоды и пьезоэлектрические чувствительные элементы. Большинство пассивных датчиков являются устройствами прямого действия.

В отличие от пассивного собрата активный датчик для своей работы требует внешней энергии, называемой *сигналом возбуждения.* При формировании выходного сигнала активный датчик тем или иным способом воздействует на сигнал возбуждения. Поскольку такие датчики меняют свои характеристики в

ответ на изменение внешних сигналов, их иногда называются *параметрическими.*

Фактически, в активных датчиках происходит преобразование изменения их внутренних характеристик в электрические сигналы, т.е. определенные параметры активных датчиков модулируют сигналы возбуждения, и эта модуляция несет в себе информацию об измеряемой величине. Например, термисторы являются температурно-чувствительными резисторами. Сами по себе термисторы не производят никаких электрических сигналов, но при прохождении через них электрического тока (сигнала возбуждения), их сопротивление может быть определено по изменению тока и/или падению напряжения на них. Значение сопротивления (в Омах) отражает измеряемую температуру, которая может быть найдена по известным зависимостям. Другим примером активных датчиков является резистивный тензодатчик, чье электрическое сопротивление зависит от величины его деформации. Для определения сопротивления датчика через него также необходимо пропустить электрический ток от внешнего источника питания.

В зависимости от выбора точки отсчета датчики можно разделить на:

- абсолютные;
- относительные.

Абсолютный датчик определяет внешний сигнал в абсолютных физических единицах, не зависящих от условий проведения измерений, тогда как выходной сигнал ***относительного*** датчика в каждом конкретном случае может трактоваться поразному.

Примером абсолютного датчика является термистор. Его электрическое сопротивление напрямую зависит от абсолютной температуры по шкале Кельвина.

Другой же популярный датчик температуры - термопара — является относительным устройством, поскольку напряжение на его выходе является функцией градиента температуры на проволочках термопары. Поэтому определить конкретную температуру по выходному сигналу термопары можно только относительно известной базовой точки отсчета.

Другим примером абсолютных и относительных датчиков является датчик давления. Показания абсолютного датчика соответствуют значениям давления относительно абсолютного нуля по шкале давлений, т.е. относительно полного вакуума. Относительный датчик определяет давление относительно атмосферного давления, которое не является нулевым.

Другой подход к классификации датчиков заключается в рассмотрении их ***характеристик.***

Для общей методологии проектирования датчиков представляется принципиальной необходимость их обоснованной классификации по существенным независимым классификационным признакам. Эта классификация не может и не должна претендовать на полное, подробное описание датчика, но должна определять его принципиальную принадлежность к классификационной группе.

Классификационные признаки:

- параметр, измеряемый датчиком;
- агрегатное состояние объекта измерения;
- принцип преобразования в чувствительном элементе датчика;
- число компонент параметра (если параметр — величина векторная) или число параметров, измеряемых датчиком.

Остальные классификационные признаки, часто встречающиеся в многочисленных попытках предложить оригинальную «всеохватную» классификацию датчиков, имеют либо вторичную природу, либо несущественны, вследствие чего любая такая классификация носит эклектический характер.

Для того чтобы отнести датчик к той или иной группе необходимо знать, какие величины он может измерять, его характеристики, на каком физическом принципе он реализован, какой механизм преобразований он применяет, из какого материала он изготовлен, какая область его применения.

В таблицах 1.1-1.6, взятых из книги [1], представлена схема такой классификации, которая является наиболее информативной.

Таблица 1.1 - Характеристики

Чувствительность	Диапазон входных значений
Стабильность(краткосрочная и долговременная)	Разрешающая способность
Точность	Избирательность
Быстродействие	Окружающие условия
Характеристики при перегрузке	Линейность
Гистерезис	Мертвая зона
Эксплуатационный ресурс	Формат выходного сигнал
Стоимость, размеры, вес	Другие

Таблица 1.2 - Материалы датчиков

Неорганические	**Органические**
Проводники	Диэлектрики
Полупроводники	Жидкости, газы, плазма
Биологические ткани	Другие

Таблица 1.3 - Средства детектирования

Биологические
Химические
Электрические, магнитные или электромагнитные волны
Тепло, температура
Механическое перемещение или волна
Радиоактивность или излучение
Другие

Таблица 1.4 - Механизм преобразований

Химические
Химические преобразования Физические преобразования Электрохимический процесс Спектроскопия Другие
Биологические
Биохимические преобразования

Физические преобразования Влияние на тестируемые организмы Спектроскопия Другие
Физические Термоэлектричество Фотоэлектричество Фотомагнетизм Магнитоэлектричество Электромагнетизм Термоупругость Электроупругость Термомагнетизм Термооптика Фотоупругость Другие

Таблица 1.5 - Области применения

Архитектура	Домашнее применение
Гражданское строительство	Окружающая среда, метеорология
проектирование	средства безопасности
Распределение, торговля, финансы	Средства информации
Энергетика	телекоммуникация
Здравоохранение, медицина	Судоходство
Оборонная промышленность	Отдых, развлечения
Научные исследования	Космос
Транспорт (исключая автомобильный)	Другие
Автомобильный транспорт	

Таблица 1.6 - Внешние воздействия

Акустические Амплитуда волны, фаза, поляризация Спектр Скорость волны Другие	**Электрические** Заряд, ток Потенциал, напряжение Электрическое поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр) Проводимость Диэлектрическая проницаемость Другие
Биологические Биомасса (вид, концентрация, состояние) Другие	**Магнитные** Магнитное поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр) Магнитный поток Проницаемость Другие
Химические Элементы (идентичность, концентрация, состояние) Другие	
Оптические Амплитуда волны, фаза, поляризация, спектр Скорость волны Коэффициент отражения Излучающая способность Отражающая способность, Поглощение Другие	**Вязкость** Упорядоченность структуры, интеграция Другие
Механические Положение (координаты линейные и угловые) Ускорение	**Излучение** Тип Энергия Интенсивность Другие

Сила Напряжение, давление Деформация Масса, плотность Движение, момент Скорость потока, расход массы Форма, шероховатость, ориентация Жесткость, податливость	**Тепловые** Температура Поток Тепло Теплопроводность Другие

Для примера рассмотрим акселерометр на поверхностных акустических волнах.

Согласно приведенным таблицам ему можно дать следующее описание.

Таблица 1.7 - Области применения

Внешнее воздействие	Ускорение
Характеристики	Чувствительность определяется как отношение изменения частоты на единицу ускорения, краткосрочная и долговременная стабильность измеряется в Гц на единицу времени и т.д.
Физический принцип	Механический
Механизм преобразований	Упругоэлектрический
Материал	Неорганический диэлектрик
Область применения	Морской и автомобильный транспорт, космические исследования, научные измерения.

Данная общая классификация не только не исключает, но и предполагает возможность и необходимость в ряде случаев разветвленной классификации внутри каждого типа датчиков.

2.3. Определение датчика

В попытках дать определение того, что же представляет собою датчик, все время присутствует соблазн чрезмерно расширительной трактовки этого понятия. Очевидно, что «граница слева» должна определяться включением его состав всех тех звеньев преобразования измеряемой величины, без которых функция преобразования датчика утрачивает свою полноту и определенность (воспроизводимость, временная стабильность, динамические свойства и т.д.). Для этого, по-видимому, целесообразно пользоваться промежуточными понятиями (например, пленочный тензометр или пленочный емкостной элемент, которые становятся датчиками, будучи наклеенными на измеряемую поверхность, и их функция преобразования включает в себя свойства клеевого слоя и самой поверхности). В состав датчика вибрации должен быть включен механический фильтр, если таковой используется при измерениях, а в состав датчика динамического давления — разделительная полость или трубопровод.

«Граница справа», по нашему мнению, должна определяться тем звеном преобразования, присутствие которого в данном датчике вызывается интересами необходимости. Например, согласование чувствительного элемента датчика с измерительной линией по реактивной составляющей, термокомпенсационные элементы и т.д.

В последние десять-пятнадцать лет обозначилась тенденция в проектировании так называемых «интеллектуальных датчиков», сдвигающая «правую границу» настолько, что каждый такой датчик превращается в автономную информационно-измерительную систему. Напомним, что латинское intellectus — познание, рассудок. К числу таких «интеллектуальных» функций относят цифровое преобразование аналоговой информации в датчике (такова в подавляющем большинстве случаев' ее естественная природа), компенсацию природных недостатков датчика (нелинейность функции преобразования, компенсация влияющих факторов), самодиагностика. Бесспорно, что все эти функции должны быть присущи информационному каналу, но весьма спорной является необходимость и целесообразность наделять этими функциями каждый датчик. Ведь датчики стоят

в местах наиболее концентрированного воздействия всех влияющих факторов, присущих данному объекту, и размещение электронных элементов в таких эксплуатационно напряженных местах совершенно неоправданно. Кроме того, построение современных информационно-измерительных систем позволяет эти функции делать общими для групп датчиков. Поэтому в большинстве случаев, специально не мотивированных, усложнение структуры датчика и повышение его стоимости наращиванием функций, без которых он может обойтись, едва-ли оправдано.

И интересы метрологической надежности, и интересы механической надежности датчика требуют минимизации его структуры.

Таким образом, в изложенной трактовке ***датчик — это самостоятельное, конструктивно автономное средство измерений, размещаемое в месте отбора информации, исполняющее функцию первичного преобразования измеряемой физической величины в электрическую или электромагнитную величину, состоящее из минимально необходимого числа звеньев преобразования измеряемой величины, обладающее однозначной функцией преобразования и требуемыми для данных целей измерений взаимно согласованными (непротиворечивыми) метрологическими и надежностными характеристиками [6].***

Такой смысл, тем самым вкладываемый в понятие «датчик», позволяет одновременно обеспечить высокую технологичность базовых конструктивов датчиков и строить на их основе унифицированные ряды датчиков, отвечающих интересам измерений всего многообразия объектов техники.

2.4. Единицы измерения

В этом учебном пособии используются единицы измерения системы СИ, принятые на 14-ой Международной Конференции по Мерам и Весам (1971). В таблице 1.8 приведены основные единицы измерения физических величин [7].

Все остальные единицы измерения являются производными от этих основных единиц. Некоторые из них приведены в Приложении.

Таблица 1.8 - Основные единицы измерения системы СИ

Величина	**Название**	**Обозначение**	**Определение (год установления)**
Длина	Метр	м	Метр - длина пути, пройденного светом в вакууме за время, ровное 1/29979245В доли секунды (1983)
Масса	Килограмм	кг	Килограмм - масса эталона, сделанного из сплава платины и иридия (1889)
Время	Секунда	с	Секунда - длительность 9192631 периодов излучения, испускаемого атомом Цезия 133 при точно определенных условиях резонанса (1967)
Электрический ток	Ампер	А	Ампер - сила установившегося электрического тока, который проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 метра друг от друга, вызывает появление силы между ними, равной $2x10^{-7}$ Н/м (1946)
Термодинамическая температура	Кельвин	К	Кельвин определяется температурой тройной точки воды (когда все три фазы воды: жидкая, парообразная и твердая –находятся в термодинамическом равновесии) Эта температура равна 273.16 К (1967)
Количество	Моль	Моль	Моль-количество элементарных частиц (атомов, вещества молекул, ионов, электронов и др.), содержащихся в 0.012 кг изотопа углерода-12 (1971)
Интенсивность света	Кандела (свеча)	Кд	Свеча – сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении черным телом, имеющим площадь поверхности 1/600000 $м^2$, при температуре замерзания P_t и давлении 101325 $Нм^2$. (1967)
Плоский угол	Радиан	Рад	Дополнительная единица

Телесный угол	Стерадиан	срад	Дополнительная единица

Часто на практике бывает неудобно напрямую использовать основные единицы или их производные, поскольку они могут быть либо слишком большими, либо слишком маленькими. Тогда применяют стандартные множители или делители. Например, 1 Ампер (А) при умножении на коэффициент 10^{-3} образует меньшую единицу, называемую миллиампером (мА), равную одной тысячной доле ампера.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию датчиков в зависимости от структуры его физической модели и модели взаимодействия со средой.
2. Что такое датчики с сосредоточенными параметрами первого порядка и второго порядка апериодического и колебательного типа?
3. Что такое датчики с распределенными параметрами?
4. Приведите классификацию датчиков в зависимости от особенностей функционирования и по квалификационным признакам.
5. Какие датчики называются пассивными, а какие активными?
6. Какие датчики называются абсолютными и относительными?
7. Приведите основные классификационные признаки датчиков.
8. Приведите определение датчика.
9. Перечислите основные единицы измерений, используемые в датчиках.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДАТЧИКАХ

3.1 Использование емкости

Из курса физики известно, что устройство из двух пластин, способных сохранять электрический заряд, называется ***конденсатором***. Если между двумя заряженными объектами поместить тестовый положительный заряд q_Q, на него начнет действовать электрическая сила, направленная от положительной пластины к отрицательной. Положительно заряженная пластина будет отталкивать тестовый заряд, а отрицательно заряженная — притягивать его. В зависимости от расположения тестового заряда между пластинами, эта сила будет иметь разное направление и величину, характеризуемые вектором силы f .

Конденсатор характеризуется величиной заряда q, накопленного на обоих пластинах, и напряжением V — положительной разностью потенциалов между ними (рисунок 3.1).

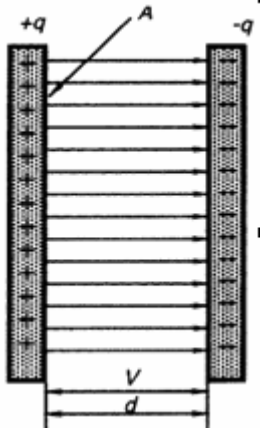

Рисунок 3.1 - Конденсатор с параллельными пластинами.

Следует отметить, что q не соответствует суммарному заряду конденсатора, равного нулю, а V не является потенциалом каждой пластины, а выражает разность потенциалов между ни-

ми. Отношение заряда к напряжению является константой для каждого конденсатора:

$$\frac{q}{V} = C \qquad (3.1)$$

Постоянная величина С называется ***емкостью*** конденсатора. Величина емкости зависит от формы пластин и их расположения друг относительно друга, а также от свойств среды между ними. Отметим, что величина *C* всегда положительная, потому что в формуле (3.1) заряд и напряжение берутся одного знака.

В системе СИ единицей емкости является Фарад: 1 фарад = 1 Кулон/Вольт (Ф = Кл/В).

Но фарад соответствует очень большой емкости, поэтому на практике используются следующие производные от него:
1 пикофарад (пФ) = 10^{-12}Ф,
1 нанофарад (нФ) = 10^{-9} Ф,
1 микрофарад (мкФ) = 10^{-6} Ф.

При включении в электронную схему емкость конденсатора может быть выражена в виде комплексного сопротивления:

$$\frac{V}{i} = -\frac{1}{j\omega C} \qquad (3.2)$$

где i — это синусоидальный ток с частотой ω.

Из формулы видно, что комплексное сопротивление конденсатора уменьшается с ростом частоты. Выражение (3.2) является законом Ома для конденсаторов. Знак минус в этой формуле означает, что напряжение на конденсаторе отстает от тока на 90°.

Конденсатор — это очень полезный электрический элемент, часто используемый в составе различных датчиков, например, для измерения расстояния, площади, объема, давления, силы и т.д.

На рисунке 3.2 показан конденсатор с параллельными пластинами, в котором проводники имеют форму пластин площади A, расположенные параллельно на расстоянии d друг от друга. Если расстояние d гораздо меньше, чем размеры пластин, электрическое поле между ними будет однородным. Это означа-

ет, что силовые линии f являются параллельными и равномерно расположенными. Из законов электромагнетизма следует, что на концах пластин крайние силовые линии будут немного искажаться, но для достаточно малых значений d мы можем этим пренебречь.

Для вычисления емкости необходимо знать разность потенциалов между пластинами V и заряд конденсатора *q:*

$$C = \frac{q}{V} \tag{3.3}$$

Существует еще одна формула для нахождения емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \tag{3.4}$$

Именно эта зависимость чаще всего используется при проектировании емкостных датчиков [3, 4, 5]. Она устанавливает взаимосвязь между площадью пластин и расстоянием между ними. При изменении одного из этих параметров меняется значение емкости, что может быть достаточно точно измерено при помощи соответствующих схем. Следует отметить, что уравнения (3.3) и (3.4) справедливы только для конденсаторов с параллельными пластинами. Изменение геометрии пластин приведет к модификации этих формул. Отношение *A/d* часто называют геометрическим фактором конденсатора с параллельными пластинами.

На рисунке 3.2 показан цилиндрический конденсатор.

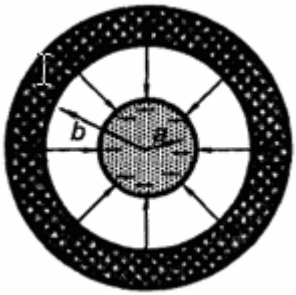

Рисунок 3.2 - Цилиндрический конденсатор

Он состоит из двух коаксиальных цилиндров, радиусы которых равны *a* и b, а длина – *l*. Если *l»b*, краевыми эффектами можно пренебречь, а для вычисления емкости использовать следующую формулу:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln(b/a)} \qquad (3.5)$$

В этом выражении *l* - длина зоны перекрытия двух цилиндров (рисунок 3.3), а коэффициент $2\pi l / \ln(b/a)$ называется геометрическим фактором коаксиального конденсатора.

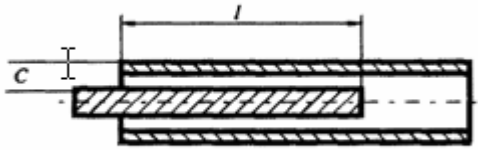

Рисунок 3.3 - Емкостной датчик перемещения

Если внутренний цилиндр способен вдвигаться внутрь внешнего цилиндра и выдвигаться из него, на основании такой конструкции можно реализовать датчик перемещений, обладающий линейной зависимостью между емкостью и перемещением (см. выражение 3.5).

Выражение (3.4) справедливо для конденсатора с параллельными пластинами, находящимися в вакууме (или в воздухе для большинства практических случаев). М. Фарадей в 1837 году первым заполнил пространство между пластинами диэлектриком и обнаружил, что при этом емкость конденсатора возросла на коэффициент ε, известный под названием относительной диэлектрической проницаемости материала.

Увеличение емкости конденсатора, благодаря наличию между его пластинами диэлектрика, объясняется эффектом поляризации молекул. В некоторых диэлектриках (например, в воде) молекулы обладают постоянным дипольным моментом,

тогда как в других диэлектриках молекулы становятся поляризованными только после того, как они попадают под действие внешнего электрического поля. Такая поляризация называется индуцированной. В обоих случаях поляризации внешнее приложенное поле всегда стремится к выравниванию направлений молекул. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. Он проиллюстрирован на рисунке 3.4.

На рисунок 3.4А показано расположение диполей до того, как на конденсатор было подано внешнее электрическое поле. А на рисунок 3.4Б показаны те же диполи при подключенном электрическом напряжении. В первом случае все диполи имеют хаотическую ориентацию, а во втором — в процессе зарядка конденсатора все диполи начинают выравниваться вдоль силовых линий электрического поля, однако тепловое перемешивание не позволяет им полностью закончить эту процедуру. Каждый диполь формирует свое собственное электрическое поле, которое в большинстве случаев направлено против внешнего электрического поля E_o. Благодаря сложению полей большого количества диполей (E'), результирующее поле внутри конденсатора становится слабей ($E = E_o + E'$) по сравнению со случаем конденсатора без диэлектрика, когда электрическое поле было равно E.

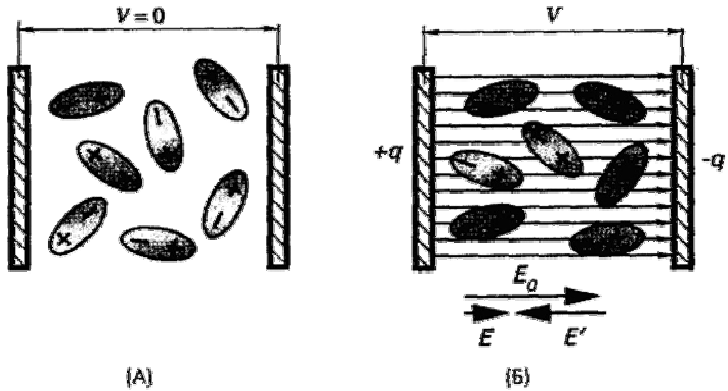

Рисунок 3.4 - Поляризация диэлектрика: А — без внешнего электрического поля диполи имеют произвольную ориентацию, Б — диполи выравниваются вдоль силовых линий приложенного электрического поля.

Уменьшение электрического поля ведет к снижению напряжения на конденсаторе:

$$V = V_0/k.$$

Подставляя это выражение в формулу (3.3), получим выражение для нахождения емкости конденсатора с диэлектриком между проводниками:

$$C = k\frac{q}{V_0} = kC_0$$

Для конденсатора с параллельными пластинами справедливо следующее соотношение:

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{d}$$

В более общей форме емкость между двумя объектами можно выразить при помощи геометрического фактора *G:*

$$C = \varepsilon_0 kG$$

где *G* определяется формой объекта (пластин) и расстоянием между ними.

Диэлектрические константы определяются при заданных частоте и температуре. Диэлектрические константы некоторых диэлектриков почти не меняются в очень широком частотном диапазоне (например, у полиэтилена), в то время как у других демонстрируют сильную отрицательную зависимость от частоты, т.е. их значения уменьшаются с ростом частоты.

Диэлектрические константы определяются при заданных частоте и температуре. Диэлектрические константы некоторых диэлектриков почти не меняются в очень широком частотном диапазоне (например, у полиэтилена), в то время как у других демонстрируют сильную отрицательную зависимость от частоты, т.е. их значения уменьшаются с ростом частоты.

На рисунок 3.5 показана зависимость диэлектрической константы от температуры, полученная для воды.

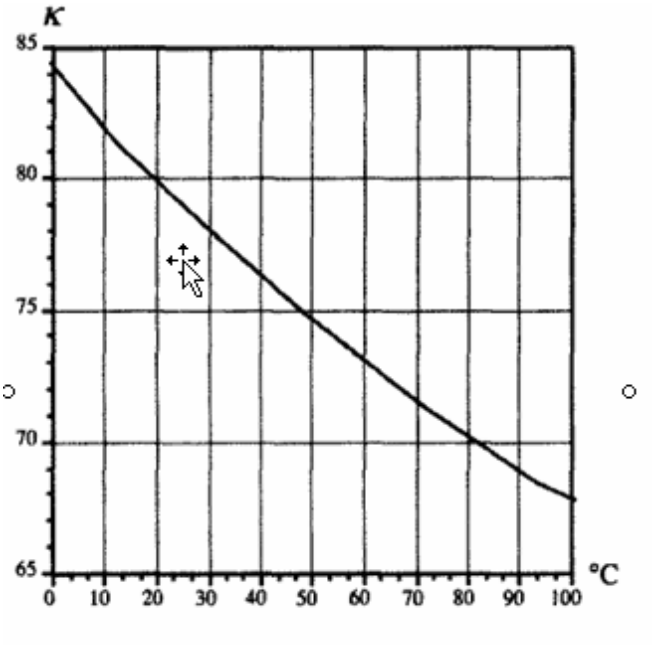

Рисунок 3.5 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости воды от температуры

В идеальном конденсаторе диэлектрическая константа *к* и его геометрический фактор имеют очень стабильное значения, они не зависят ни от температуры, ни от влажности, ни от давления и ни от других факторов окружающей среды. Для построения электронных схем очень важно применять конденсаторы, характеристики которых близки к идеальным.

Однако при проектировании емкостных датчиков необходимо выбирать конденсаторы с параметрами, изменяющимися либо от температуры, либо от давления, либо от влажности, либо от любого другого исследуемого фактора. Если какая-либо характеристика конденсатора меняется при определенном внешнем воздействии, на его основе можно построить соответствующий датчик.

Рассмотрим емкостной датчик, измеряющий уровень воды (рисунок 3.6).

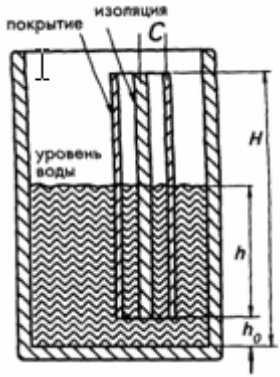

Рисунок 3.6 – Емкостной датчик уровня воды

Он изготовлен на основе коаксиального конденсатора, в котором поверхность каждого цилиндра покрыта тонким слоем изоляционного материала для предотвращения короткого замыкания через воду (этот слой также является диэлектриком, но он не будет учитываться в последующих рассуждениях, поскольку его свойства не меняются в процессе измерений). Датчик размещается в резервуаре с водой. При увеличении уровня вода заполняет все больший объем между коаксиальными проводниками, изменяя при этом емкость датчика. Полная емкость датчика определяется следующим выражением:

$$C_h = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 G_1 + \varepsilon_0 k G_2 \qquad (3.6)$$

где C_1 — емкость части датчика, свободной от воды,
C_2 — емкость части датчика, заполненной водой,
G_1 и G_2—соответствующие геометрические факторы.

Из формул (3.5) и (3.6) можно получить выражение для полной емкости датчика:

$$C_h = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)}\left[H - h(1-k)\right]$$

где h — высота части датчика, заполненной водой.

Если вода находится ниже уровня h_0, емкость датчика остается постоянной и равной:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)} H$$

На рисунке 3.7 показана зависимость емкости датчика от уровня воды (при этом датчик имел следующие размеры: a = 10 мм, b= 12 мм, H= 200 мм, исследуемая жидкость была водой).

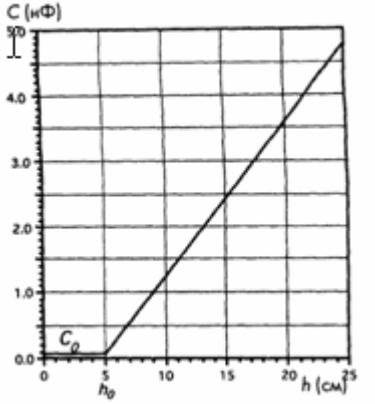

Рисунок 3.7 – Зависимость емкости датчика от уровня воды

Она представляет собой прямую линию, начинающуюся с уровня h_o.

Поскольку диэлектрическая константа воды зависит от температуры, емкостной датчик следует использовать совместно с датчиком температуры — например, термистором или резистивным детектором температуры, который будет отслеживать температуру окружающей среды.

Соответствующая температурная корректировка сигнала емкостного датчика может проводиться на специальном электронном преобразователе.

Наклон линии передаточной функции зависит от типа используемой жидкости. Например, если вместо воды в резервуар

налить трансформаторное масло, чувствительность датчика снизится в 22 раза.

Другим примером является емкостной датчик влажности. В таком датчике диэлектрический слой между пластинами конденсатора выполняется из гигроскопичного материала. Такой диэлектрик поглощает молекулы воды и в соответствии с их количеством меняет диэлектрическую константу. Согласно уравнению (3.8) это приводит к изменению емкости датчика, что может быть достаточно точно измерено. По полученному значению и определяется относительная влажность.

На рисунок 3.9 показана зависимость емкости такого датчика от величины относительной влажности. Как видно из рисунка, эта зависимость не является линейной, но это, как правило, учитывается на стадии обработки сигналов.

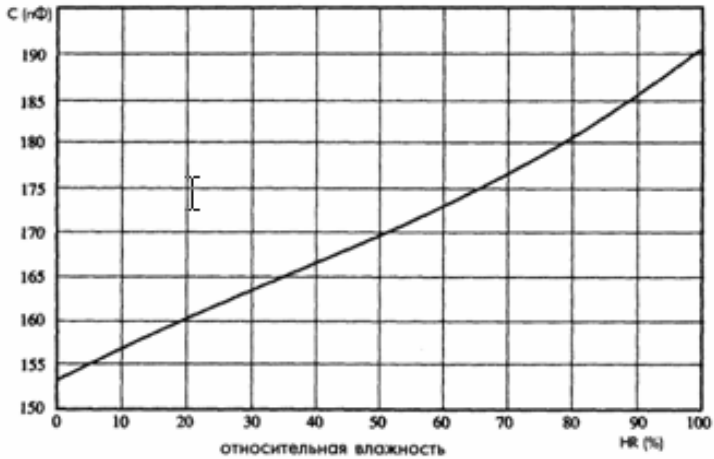

Рисунок 3.8 – Зависимость емкости датчика относительной влажности от уровня влажности

3.2 Использование сопротивления в датчиках

Если изготовить два геометрически идентичных стержня из разных материалов (например, из меди и стекла) и приложить к

ним равное напряжение, ток, протекающий по ним, не будет одинаковым. Для каждого материала есть характеристика, описывающая его способность пропускать электрический ток. Она называется ***удельным сопротивлением***. При этом говорят, что материал обладает электрическим ***сопротивлением***, которое можно определить по закону Ома:

$$R = \frac{V}{i},$$

где V – напряжение;

i - ток в цепи.

Для чисто резистивных элементов (не обладающих ни емкостью, ни индуктивностью) напряжение и ток совпадают по фазе.

Любые материалы (кроме сверхпроводников), имеют удельное сопротивление, и поэтому называются ***резисторами.***

Сопротивление является характеристикой любого устройства. Его величина определяется как самим материалом, так и геометрией резистора. Материал, как правило, характеризуется величиной ***удельного сопротивления ρ:***

$$\rho = \frac{E}{j}$$

где ρ — плотность тока.

В системе СИ единицей измерения удельного сопротивления является ОмхМетр.

Достаточно часто используется величина, обратная удельному сопротивлению, называемая ***удельной проводимостью*** или ***электропроводностью: σ =1/ ρ,*** которая измеряется в сименсах (См).

Для нахождения сопротивления проводника можно воспользоваться следующей формулой:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{a}$$

где a — площадь поперечного сечения проводника,

l — его длина.

Температурная чувствительность [5]

Проводимость материала зависит от изменений температуры и в сравнительно узком диапазоне она может быть выражена при помощи температурного коэффициента сопротивления (ТКС) α*:*

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(t - t_0)],$$

где p_0 — удельное сопротивление материала при эталонной температуре t_0 (обычно равной либо 0°С, либо 25°С).

В более широком диапазоне зависимость удельного сопротивления от температуры является нелинейной функцией.

На рисунке 3.9 показано, как нелинейная зависимость удельного сопротивления вольфрама от температуры в широком диапазоне значений может быть заменена прямой линией с ***a*** = 0,0058 °С$^{-1}$, полученной методом наименьших квадратов.

Такое приближение может быть использовано только для оценочных расчетов. Для случаев, где требуется большая точность, для моделирования удельного сопротивления применяют полиноминальную зависимость более высокого порядка.

Например, удельное сопротивление вольфрама в широком температурном диапазона может быть найдено из уравнения второго порядка:

$$\rho = 4{,}45 + 0{,}0269t + 1{,}914 \times 10^{-6} t^2,$$

где t — температура в °С.

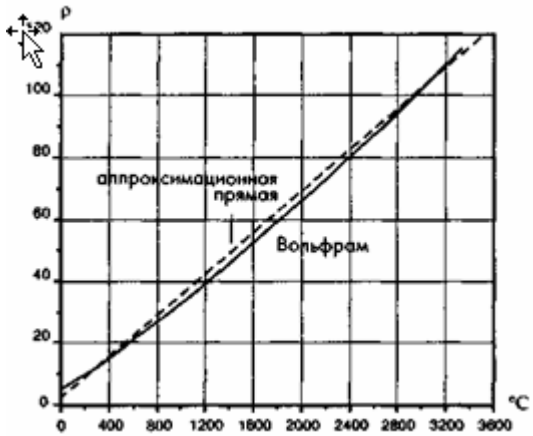

Рисунок 3.9 – Зависимость удельного сопротивления вольфрама от температуры

Металлы имеют положительный ТКС (ПТКС), а многие полупроводники и оксиды — отрицательный (ОТКС).

Для резисторов, используемых в электронных схемах, желательно применять материалы с низким температурным коэффициентом, тогда как для построения температурных датчиков резисторы должны обладать высоким ТКС.

Резистивные датчики температуры часто называются ***термисторами*** или ***температурными детекторами*** (**РДТ**) [3,4,5].

Наиболее популярным РДТ является платиновый детектор, работающий в широком температурном диапазоне: 200...600°С. Зависимость сопротивления R РТД от температуры показана на рисунке 3.10.

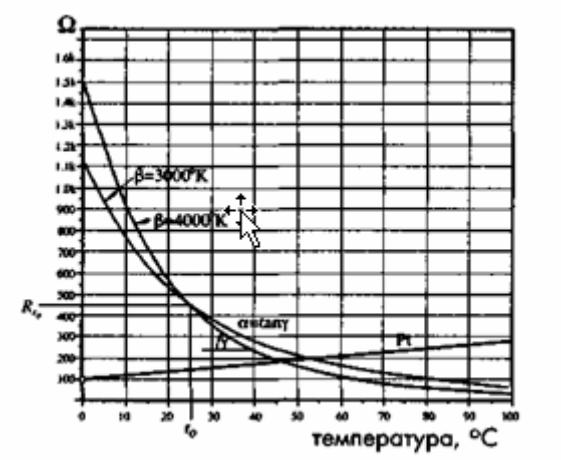

Рисунок 3.10 – Зависимость сопротивления от температуры для двух термисторов и платинового РДТ

Для сопротивления, имеющего при температуре 0°С значение R_0, линейную зависимость, полученную методом наименьших квадратов, можно записать в виде:

$$R = R_0(1{,}00 + 36{,}79 \times 10^{-4} \cdot t)$$

где t - температура в °С, а R — в Омах.

Множитель при температуре (наклон прямой) называется чувствительностью датчика, которую можно записать как: +0.3679%/°С.

Из рисунка видна небольшая нелинейность кривой сопротивления. Если не произвести корректировку, в результатах может появиться значительная погрешность. Для получения более точной аппроксимации можно применить полиноминальную зависимость второго порядка, при этом точность станет лучше.

Термисторы — это резисторы с большим значением либо положительного, либо отрицательного ТКС. Термисторы изготавливаются из керамических полупроводников, состоящих, как правило, из оксидов одного или нескольких следующих металлов: никеля, марганца, кобальта, титана, железа. Оксиды других металлов почти никогда не применяются. Сопротивления термисторов лежат в пределах от долей Ом до многих мегаОм.

Термисторы бывают в форме диска, капли, трубки, пластины или тонкого слоя, нанесенного на керамическую подложку. Последние достижения в области тонкопленочных технологий позволяют изготавливать термисторы методом печатного монтажа на керамических подложках.

Термисторы с отрицательным ТКС часто выполняют в форме бусинок. Обычно такие термисторы изготавливают из проводов из платины, спеченных с керамикой. Платина выбрана из-за комбинации сравнительно низкого электрического сопротивления и достаточно высокого теплового коэффициента. В процессе изготовления небольшие порции смеси оксидов металлов и соответствующего связующего вещества распределяются на паре проводов из платины, находящихся в слабом натяжении. После того как смесь равномерно осела, бусинки помещаются в печь для спекания. При этом оксиды металлов застывают вокруг проводов, формируя прочные соединения. Далее на термисторы могут быть нанесены покрытия из стекла или органических веществ.

Термисторы обладают нелинейной зависимостью сопротивления от температуры (рисунок 3.10), которую можно аппроксимировать несколькими вариантами уравнений.

Наиболее популярным среди них является экспоненциальное выражение:

$$R_t = R_{t0} \cdot e^{\beta(1/T - 1/T_0)} \qquad (3.7)$$

где T_0 — калибровочная температура в Кельвинах, R_{t0} — значение сопротивления при температуре калибровки, а β—характеристическая температура материала в Кельвинах. Обычно β лежит в диапазоне 3000...5000 К, и в пределах узкой зоны может считаться независимой от температуры, что делает выражение (3.7) очень хорошей аппроксимацией. Если требуется более высокая точность, применяется полиноминальная аппроксимация.

На рисунок 3.10 показаны зависимости сопротивления от температуры для термисторов с коэффициентами β равными 3000 и 4000К. Из рисунка видно, что платиновый РТД обладает достаточно линейной температурной характеристикой с положительным наклоном, но гораздо меньшей чувствительностью по сравнению с термисторами, которые являются нелинейными устройствами с от-

носительно высокой чувствительностью и отрицательным наклоном.

Традиционно термисторы тестируются при температуре T_0 = 25°С (T_0 = 298,15 К), а платиновый РТД - при T_0 = 0°С (T_0 = 273,15 К).

Тензочувствительность

Обычно при механической деформации материала его электрическое сопротивление изменяется. Это явление называется ***пьезорезистивным эффектом [1,3,5,6].*** С одной стороны, в некоторых случаях этот эффект является причиной возникновения погрешностей. С другой стороны, на его основе можно реализовать ***тензодатчики***, реагирующие на механическое напряжение σ:

$$\sigma = \frac{F}{a} = E \cdot \frac{dl}{l},$$

где E — модуль Юнга материала, а F — приложенная сила.

В этом уравнении отношение $\delta l = \frac{dl}{l}$ называется относительной ***деформацией*** материала.

На рисунке 3.11 показан цилиндрический проводник (провод), растянутый при помощи силы F. Объем провода V остается постоянным, тогда как его длина увеличивается, а площадь поперечного сечения уменьшается.

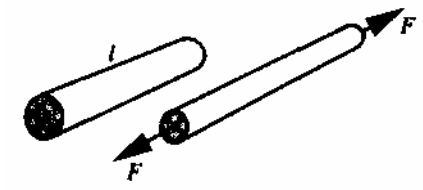

Рисунок 3.11 – Механическое напряжение приводит к изменению геометрии проводника и его сопротивления

В результате получим:

$$R = \frac{\rho}{v} \cdot l^2.$$

После дифференцирования получим выражение для определения чувствительности сопротивления к удлинению провода:

$$\frac{dR}{dl} = 2\frac{\rho}{v}l\,.$$

Из этого выражения можно сделать вывод, что чувствительность повышается при увеличении длины провода и его удельного сопротивления, а также при уменьшении поперечного сечения.

Относительное изменение сопротивления провода является линейной функцией от деформации δl и может быть выражено в виде:

$$\frac{dR}{R} = S_{\delta} \cdot \delta l$$

где δl — ***коэффициент тензочувствительности*** или ***чувствительность тензоэлемента***.

Для металлических проводов он лежит в пределах 2...6, а для полупроводников -40...200.

Самыми первыми тензоэлементами были металлические нити, расположенные на диэлектрической пленке. В настоящее время они изготавливаются из фольги из константана (сплава меди и никеля) или монокристаллических полупроводниковых материалов (например, кремния, легированного бором). Для придания элементам нужной формы используют методы либо механической обработки, либо фотохимического травления.

При механическом воздействии на полупроводниковый тензоэлемент величина изменения его сопротивления определяется либо типом материала, либо концентрацией примеси. Однако чувствительность полупроводниковых тензодатчиков довольно сильно зависит от температуры, что при работе в широком температурном диапазоне требует проведения соответствующей компенсации.

Влагочувствительность

При выборе материала для резистора необходимо учитывать его удельное сопротивление и восприимчивость к факторам окружающей среды. Одним из таких факторов является количество

влаги, поглощаемое резистором. На основе гигроскопичных материалов, удельное сопротивление которых сильно зависит от концентрации поглощенных молекул воды, можно построить резисторы, реагирующие на изменение влажности. Такие резисторы применяются в резистивных датчиках влажности и называются ***гигристорами [6]***. Типовой гигристор состоит из подложки, на которую методом трафаретной печати нанесены два встречно-штыревых электрода, покрытые гигроскопичным электропроводным полупроводниковым гелем (рисунок 3.12).

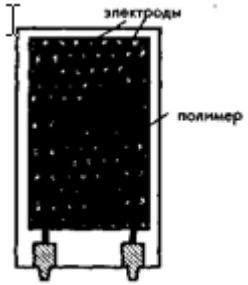

Рисунок 3.12 – Схема гигристора

Гель, как правило, состоит из органических веществ с добавлением углеродного порошка. Этот гель тщательно перемешивается до образования однородной массы. Другой тип гигристоров изготавливается из пленки из хлорида лития и связующего вещества. Подложка датчика погружается в гель с контролируемой скоростью до тех пор, пока гель не заполнит все пространство между электродами. Подложки с нанесенным покрытием подвергаются термоотверждению, проводимому при определенной температуре и влажности. Зависимость сопротивления гигристоров от влажности имеет нелинейный характер (рисунок 3.13), что необходимо учитывать при проведении калибровки и обработки результатов измерений.

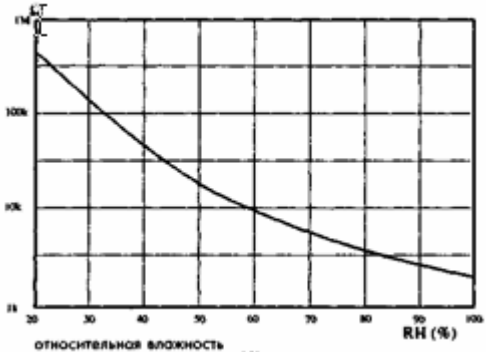

Рисунок 3.13 – Передаточная функция гигристора

3.3 Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект заключается в образовании в кристаллическом материале электрических зарядов при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула 8Ю$_2$), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например, в поливинилиденфториде.

В 1927 году А. Мейснер предложил упрощенную модель для объяснения пьезоэлектрического эффекта. Кристалл кварца в этой модели представлен в виде элементарных ячеек, состоящих из атомов Si и спаренных атомов O_2 (рисунок 3.14). Кварцевый кристалл имеет срезы вдоль осей *x*, *y* и z. На рисунке 3.14 показано поперечное сечение вдоль оси z. В элементарную монокристаллическую ячейку входят три атома кремния и шесть атомов кислорода. Каждый атом кремния обладает четырьмя положительными зарядами, а каждая пара атомов кислорода - четырьмя отрицательными (по два на атом). Поэтому без приложения механических напряжений кварцевая ячейка является электрически нейтральной. Когда вдоль оси *x* прикладывается внешняя сила P_x, кристаллическая решетка деформируется. На рисунке 3.14Б показано, как сдавливающая сила сдвигает атомы кристалла таким образом, что положительный атом кремния перемещается на одну

сторону решетки, а отрицательно заряженная пара атомов кислорода — на другую. В результате чего вдоль оси *y* наблюдается перераспределение зарядов. Если кристалл растянуть вдоль оси *x* (рисунок 3.14В), в результате деформации растяжения заряды перераспределятся вдоль оси *y* в противоположном направлении. Эта упрощенная модель показывает, как на поверхности кристаллического материала могут образовываться электрические заряды в ответ на приложенное механическое воздействие.

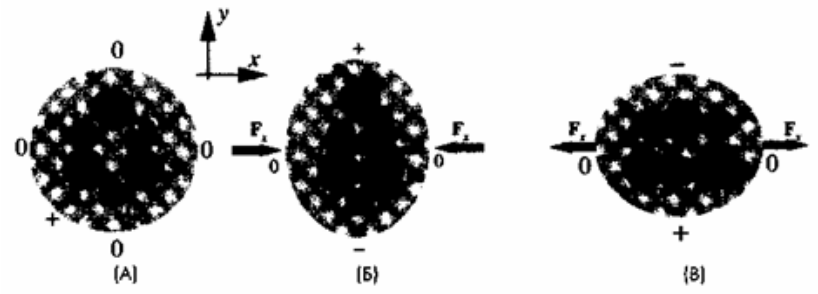

Рисунок 3.14 – Передаточная функция гигристора

Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах от среза прикрепляют электроды (рисунок 3.15). 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 V на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выравнивают заряды вдоль всей их поверхности, лишая конденсатор избирательности. Однако, если форму электродов усложнить, можно определить точное место приложения внешней силы, детектируя сигналы с конкретных электродов.

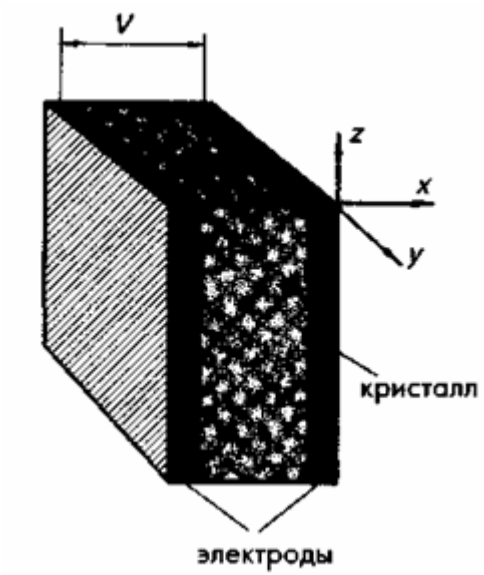

Рисунок 3.15 – Пьезоэлектрический датчик, сформированный при помощи электродов, нанесенных на поляризованный кристалл

Пьезоэлектрический эффект является обратимым физическим явлением. Это означает, что приложенное к кристаллу электрическое напряжение приводит к появлению механической деформации. Если разместить на кристалле несколько электродов и на одну пару из них подать напряжение, на остальных парах электродов будет накапливаться заряд, сформированный из-за возникшей деформации. Такой прием достаточно широко применяется в разных типах пьезоэлектрических преобразователей.

Пьезоэлектрический эффект можно оценить через вектор поляризации [4,5]:

$$P = P_{xx} + P_{yy} + P_{zz},$$

где x, y и z— координатные оси обычной ортогональной системы, совмещенные с осями кристалла.

Слагаемые этого выражения определяются в следующем виде (более полные формулы включают в себя также напряжение сдвига и соответствующие d - коэффициенты):

$$P_{xx} = d_{11}\sigma_{xx} + d_{12}\sigma_{yy} + d_{13}\sigma_{zz},$$
$$P_{yy} = d_{21}\sigma_{xx} + d_{22}\sigma_{yy} + d_{23}\sigma_{zz},$$
$$P_{zz} = d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz},$$

где σ— осевое напряжение,
d_{mn} — постоянные пьезоэлектрические коэффициенты вдоль ортогональных осей срезов кристалла.

Эти коэффициенты имеют размерность: Кулон/Ньютон, т.е. единичный заряд на единицу силы.

Для удобства вычислений были введены две дополнительные единицы. Первая из них называется *g* - коэффициентом и определяется как отношение соответствующей пьезоэлектрической константы и абсолютной диэлектрической постоянной:

$$g_{mn} = \frac{d_{mn}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{mn}},$$

Этот коэффициент показывает градиент напряжения на кристалле на каждую единицу приложенного давления. Его размерность $Вольт \cdot метр / Ньютон$.

Другой коэффициент, *h,* представляет собой произведение g-коэффициента на соответствующий модуль Юнга для каждой оси кристалла. Его размерность: $Вольт / метр$.

Пьезоэлектрические кристаллы являются прямыми преобразователями механической энергии в электрическую. Эффективность такого преобразования может быть выражена через, так называемый, *коэффициент связи* $\boldsymbol{\kappa_{mn}}$

$$k_{mn} = \sqrt{d_{mn} h_{mn}},$$

Эти коэффициенты являются очень важными характеристиками для случаев, где необходимо обеспечивать высокую эффективность передачи энергии, например, в акустических и ультразвуковых датчиках.

Величина заряда, генерируемого на поверхности пьезоэлектрического кристалла, пропорциональна силе, приложенной, например, в направлении оси ***x:***

$$Q_x = d_{11} F_x,$$

Кристалл с нанесенными на него электродами представляет собой конденсатор, обладающий емкостью *C*.

Напряжение на этом конденсаторе определяется следующим выражением:

$$V = \frac{Q_x}{C} = \frac{d_{11}}{C} F_x,$$

В свою очередь, емкость может быть представлена через площадь поверхности электрода *a* и толщину кристалла *l* (здесь учитывается площадь электродов, а не самого кристалла, поскольку пьезоиндуцированный заряд накапливается только на них):

$$C = k\varepsilon_0 \frac{a}{l}$$

где ε_0 — электрическая постоянная, а *к* — диэлектрическая проницаемость. Тогда выражение для напряжения принимает вид:

$$V = \frac{d_{11}}{C} F_x = \frac{d_{11}}{k\varepsilon_0 a} F_x. \qquad (3.8)$$

Кристаллиты (кристаллические элементарные ячейки) пьезоэлектрика могут рассматриваться как электрические диполи. В некоторых материалах, таких как кварц, эти ячейки обычно ориентированы вдоль осей кристалла, поэтому такие структуры обладают достаточно высокой чувствительностью к механическому напряжению. В других материалах диполи ориентированы произвольным образом, и для того, чтобы такие структуры проявили свои пьезоэлектрические свойства, их необходимо предварительно поляризовать (рисунок 3.16).

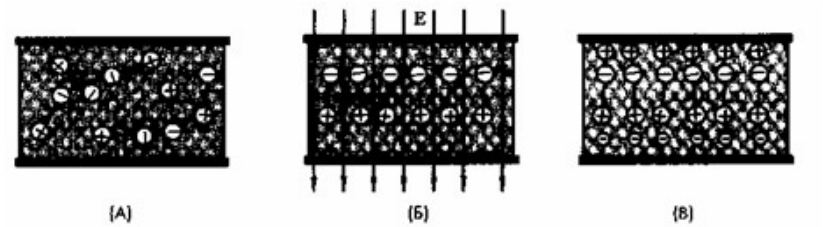

Рисунок 3.16 – Поляризация пьезоэлектрических материалов

Существуют несколько технологий поляризации. После поляризации кристаллы становятся постоянно поляризованными, но электрически заряженными они остаются только сравнительно короткий промежуток времени. Это объясняется тем, что в окружающей среде находится много заряженных ионов, а также достаточное количество свободных носителей зарядов содержится внутри самого материала, которые могут передвигаться под действием электрического поля, и эти свободные заряды, приближаясь к соответствующим концам диполей, нейтрализуют их (рисунок 3.16В). Поэтому вскоре поляризованный пьезоматериал становится электрически разряженным и удерживается в этом состоянии в течение всего времени, пока находится в стационарных условиях. Однако когда к материалу прикладывается механическое напряжение, или он начинает обдуваться ветром, состояние равновесия нарушается и на поверхности пьезоэлектрика появляется электрический заряд. Если механическое напряжение будет поддерживаться некоторое время, заряды в материале опять нейтрализуются за счет внутренних утечек.

Таким образом, можно сделать вывод, что пьезоэлектрические сенсоры являются ***чувствительными только к изменениям тензоусилий***, а не к их постоянному уровню. Другими словами, ***пьезоэлектрические датчики — это устройства переменного, а не постоянного тока.***

Направленная чувствительность пьезоэлектриков (d-коэффициенты) зависит от температуры. Для некоторых материалов (например, кварца) чувствительность падает с ростом температуры со скоростью —0.016%/°С. Для других пьезоэлектриков, таких как пленки PVDF и керамики, при температурах до 40°С d-коэффициенты уменьшаются, а при более высоких температурах — растут. В настоящее время самыми популярными материалами для изготов-

ления пьезоэлектрических датчиков являются разные типы керамики [7-9]. Одним из самых первых ферроэлектрических керамических материалов был титанат бария, обладающий поликристаллической структурой и следующей химической формулой: $BaTiO_3$. Стабильность поляризации обеспечивается за счет действия коэрцитивных сил диполей. В некоторых материалах с течением времени происходит уменьшение поляризации. Для снижения этого эффекта в основной материал вводятся дополнительные добавки, цель которых заключается в «запирании» диполей в определенном положении [3]. И пьезоэлектрическая константа, и диэлектрическая проницаемость материала ***k*** зависят от рабочей температуры. Поскольку эти величины входят в формулу (3.8): одна в числитель, другая в знаменатель, их изменения будут взаимно уничтожаться, что приведет к повышению стабильности выходного напряжения ***V*** в широком температурном диапазоне.

Пьезоэлектрические элементы могут использоваться либо в форме монокристалла, либо в виде многослойной структуры, в которой отдельные пластины соединяются вместе при помощи электродов, размещенных между ними. На рисунок 3.17 показан двухслойный датчик силы [5]. Когда к этому датчику прикладывается внешняя сила, одна из его частей расширяется, в то время как другая сжимается, что при корректном включении приводит к удвоению выходного сигнала. Двойные сенсоры могут включаться либо параллельно, как показано на рисунок 3.18А, либо последовательно — рисунок 3.18В.

Электрическая эквивалентная схема пьезоэлектрического датчика представляет собой параллельное соединение сопротивления утечки r, емкости С и источника тока i , индуцированного механическим напряжением. В зависимости от типа соединения слоев эквивалентные схемы сдвоенных датчиков будут соответствовать рисунок 3.18Б и рисунок 3.18Г. Сопротивление утечки, как правило, является очень большим (порядка 10^{12} - 10^{14} Ом), это значит, что датчик обладает чрезвычайно высоким выходным импедансом. Поэтому для согласования с последующими электронными цепями необходимо использовать специальные интерфейсы, представляющие собой преобразователи заряда/тока в напряжение или усилители напряжения, имеющие высокие входные сопротивления.

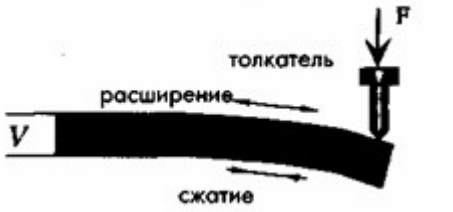

Рисунок 3.17 – Двуслойный пьезоэлектрический датчик

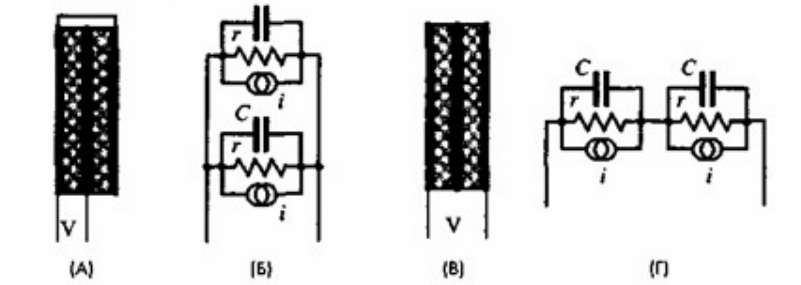

Рисунок 3.18 – Параллельное (А) и последовательное соединение слоев в пьезоэлектрическом датчике и их эквивалентные электрические схемы (Б и Г)

Пьезоэлектрические пленки[5]

В 1969 году японский ученый Каваи обнаружил сильный пьезоэлектрический эффект в PVDF пленках. PVDF— это полукристаллический полимер, степень кристаллизации которого составляет 50% [11]. Подобно другим полукристаллическим полимерам PVDF представляет собой слоевую структуру с аморфными зонами.

Пленка является практически прозрачной в видимом и ближнем ИК (инфракрасном) диапазонах и поглощает излучение дальней ИК области электромагнитного спектра. Ее плотность равна около 1780 кг/м^3. PVDF является механически прочным и гибким материалом. Для применения в пьезодатчиках эту пленку обычно вытягивают в одном или сразу двух направлениях так, чтобы ее размеры увеличились в несколько раз. Коэффициенты упругости (такие как модуль Юнга) определяются величиной растяжения. Например, если пленка была растянута при температуре 140°С до со-

отношения 4:1, ее модуль Юнга равен 2.1 ГПа, а если до соотношения 6.8:1, модуль составляет 4.1 ГПа. Удельное сопротивление пленки зависит от величины ее относительного удлинения. Например, при небольшом удлинении удельное сопротивление равно $6{,}3 \times 10^{15}$ Ом*см, в то время как при степени растяжения 7:1, оно составляет 2×10^{16}Ом*см.

Хотя пьезоэлектрические коэффициенты пленки из PVDF не такие высокие, как у некоторых других пьезоматериалов, они обладают уникальным свойством сохранять поляризацию даже при воздействии на них очень сильных переменных электрических полей.

К тому же пленки из РУОР обладают очень хорошей временной стабильностью: при хранении при температуре 60°С они теряют за шесть месяцев только около 1-2% чувствительности.

Другим преимуществом пьезопленок над пьезокерамикой является их низкий акустический импеданс, который по значению близок к воде, человеческим тканям и другим органическим материалам. Например, акустический импеданс пьезопленки отличается от импеданса воды только в 2,6 раз, в то время как для пьезокерамики он, как правило, в 11 раз больше. Близкие значения импедансов позволяют осуществлять более эффективную передачу акустических сигналов в воде и тканях.

Пьезоэлектрические пленки обладают следующими уникальными свойствами:

• Широким частотным диапазоном: 0.001...10^9 Гц

• Большим динамическим диапазоном: 10^{-8}...10^6р81 (фунтов на квадратный дюйм) или от мкТорр до Мбар

• Низким акустическим импедансом: близким к воде, человеческим тканям и клеевым составам

• Высокой упругой податливостью

• Высоким выходным напряжением: в 10 раз выше, чем у пьезокерамики при одинаковых приложенных силах

• Высокой электрической прочностью диэлектрика: выдерживают поля до 75 В/мкм, при которых большинство пьезокерамических материалов теряют поляризацию

• Высокой механической прочностью и ударостойкостью: 10^9...10^{10} пределов прочности

• Высокой стабильностью: устойчивостью к влажности (вла-

гопоглощение менее 0.02%), большинству химических реактивов, окислителям, мощному ультрафиолетовому (УФ) и ядерному излучениям

- Из них можно получать структуры произвольной формы
- Их можно соединять обычными клеями.

Новые сополимеры PVDF, разработанные в последние годы, нашли широкую сферу применения в пьезоэлектрических полимерных датчиках. Такие сополимеры используются при более высоких температурах (135°С), и из них можно получать новые формы датчиков: цилиндрические и полусферические. Из них можно изготавливать сенсоры, толщина которых превышает предельные значения для устройств на основе PVDF пленок: например, кремниевые датчики с ультратолстым (200 А) покрытием и гидролокаторы с цилиндром, толщина стенок которого превышает 1200 мкм. Пьезоэлектрические кабели также реализуют из сополимеров.

В отличие от пьезокерамических преобразователей датчики на основе пьезоэлектрических пленок обладают более широкими динамическим и частотным диапазонами. Широкая полоса частот (практически от 0 до 2 ГГц) и низкая добротность могут быть объяснены мягкостью, присущей полимерам.

В передатчиках звуковых сигналов пленочный пьезоэлемент, зафиксированный на двух концах, вибрирует на частоте, определяемой коэффициентом $\boldsymbol{d_{31}}$. Такие датчики нашли широкое применение в ультразвуковой технике, работающей на частотах до 50 кГц. При использовании в ультразвуковых передатчиках (частота более 500 кГц) частота пьезодатчиков определяется коэффициентом $\boldsymbol{d_{33}}$.

Максимальный коэффициент передачи достигается на частоте резонанса по толщине. Основной полуволновой резонанс пленочного пьезоэлектрического сенсора толщиной 28 мкм наступает на частоте порядка 40 МГц. Частота резонанса всегда зависит от толщины пленки: она меняется от единиц МГц для толстых пленок (= 1000 мкм) до >100 МГц для тонких пленок (порядка мкм).

Датчики на пьезоэлектрических пленках имеют и ряд ограничений. Они обладают довольно слабым электромеханическим коэффициентом связи по сравнению с пьезокерамическими сенсорами, особенно на частоте резонанса и на низких частотах. Пленки из сополимеров могут использоваться и храниться при температурах, не превышающих 135°С, а PVDF пленки рекомендуется использо-

вать при температурах до 100°С. Как только на пленку нанесены электроды, полученный сенсор становится чувствительным к электромагнитному излучению. Для защиты устройств от высокочастотных электромагнитных помех и от радиочастотных шумов необходимо применять методы экранирования.

Ппьезоэлектрические пленки обладают низкой плотностью, отличной чувствительностью и механической прочностью. Упругая деформация пьезопленок в 10 раз превышает аналогичную характеристику керамики. Пьезоэлектрические полимеры могут напрямую прикрепляться к тонкопленочным структурам, не мешая их механическому перемещению. Пьезопленки годятся для применения в датчиках деформации, которые должны обладать высокой чувствительностью в широком частотном диапазоне. Низкий акустический импеданс полимеров позволяет изготавливать преобразователи, эффективно передающие энергию в широкой полосе частот воздуху и другим газам.

В миниатюрных полупроводниковых датчиках пьезоэлектрический эффект является основным средством преобразования механической деформации в электрические сигналы и наоборот. Однако этот эффект применим для преобразования переменных входных сигналов и не годится для стационарных и медленно меняющихся внешних воздействий.

Поскольку кремний сам по себе не обладает пьезоэлектрическими свойствами, ему можно их придать при помощи нанесения кристаллических слоев пьезоматериалов.

Оксид цинка часто используется для построения ультразвуковых акустических датчиков, устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), микровесов и т.д. Основным достоинством оксида цинка является простота химического травления. 2п0 часто наносится на кремний методом напыления.

Нитрид алюминия считается отличным пьезоэлектрическим материалом, благодаря высокой акустической проводимости и устойчивости к влажности и высокой температуре. Его пьезоэлектрический коэффициент несколько ниже, чем у оксида цинка, но выше, чем у других тонкопленочных пьезоматериалов, за исключением керамики. Акустические свойства нитрида алюминия позволяют использовать его в гигагерцовом частотном диапазоне. Тонкие пленки из AIN обычно изготавливаются по технологии химического осаждения из газовой фазы

или методом реактивной эпитаксии. Недостаток этих способов — высокая температура нагрева подложки (до 1300°С).

Тонкие пленки из PZT обладают большим пьезоэлектрическим коэффициентом, чем AIN и ZnO, что делает их перспективными для использования в детекторах теплового излучения.

3.4 Пироэлектрический эффект

Подобно пьезоэлектрикам пироэлектрики используются в виде тонких пленок, с противоположных сторон которых нанесены электроды для сбора индуцированных теплом зарядов (рисунок 3.26). Пироэлектрический детектор можно представить в виде конденсатора, электрически заряжающегося от потока тепла. Такой датчик не нуждается ни в каких внешних сигналах возбуждения, ему только требуется соответствующая интерфейсная электронная схема для измерения заряда. В отличие от термопар (термоэлектрических устройств), на выходе которых появляется постоянное напряжение, когда два спая различных металлов находятся при стационарной, но разной температуре (см. раздел 3.9), в пироэлектриках формируется заряд в ответ на *изменение* температуры [3,5].

Поскольку изменение температуры происходит при перемещении тепловых волн, пироэлектрические устройства являются ***детекторами потока тепла***. Их иногда называют ***динамическими датчиками,*** что соответствует их физической природе.

Когда пироэлектрический кристалл подвергается воздействию потока тепла (например, от источника ИК излучения), его температура повышается, и он также становится источником тепла. Поэтому с противоположной стороны кристалла возникает отток тепла, как показано на рисунок 3.19.

Считается, что кристалл обладает пироэлектрическими свойствами, если при изменении температуры в нем появляется спонтанная поляризация. В дополнение к пироэлектрическим свойствам все эти кристаллы в той или иной степени являются пьезоэлектриками, т.е. в них появляются заряды в ответ на механическое напряжение.

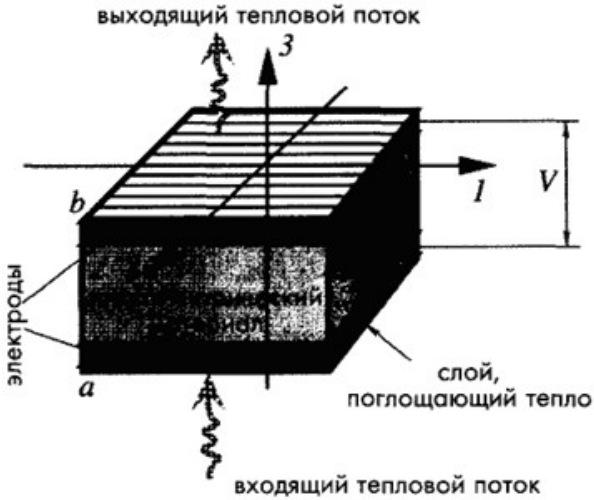

Рисунок 3.19 – Пироэлектрический датчик

Пироэлектричество было открыто в кристаллах турмалина еще в 18 веке (хотя есть сведения, что греки заметили этот эффект на 23 века раньше). Позже, в 19 веке, для изготовления пироэлектрических датчиков использовались кристаллы сегнетовой соли. После 1915 года в качестве пироэлектриков стали применяться следующие материалы: KDP (KH_2PO_4), ADP ($NH_4H_2PO_4$), $BaTiO_3$ и композиции $PbZrO_3$ и $PbTiO_3$, известные как PZT. В настоящее время известно более 1000 материалов, обладающих свойством обратимой поляризации. Они называются ферроэлектрическими кристаллами. Самыми интересными из них считаются триглицин сульфат (TGS) и танталат лития ($LiTaO_3$). В 1969 году ученый Каваи обнаружил, что некоторые пластмассы, например, поливинил фторид (PVF) и поливинилидин фторид (PVDF) [5], обладают сильными пьезоэлектрическими свойствами. Также оказалось, что эти материалы также являются и пироэлектриками.

Любой пироэлектрик можно представить в виде композиции большого числа кристаллитов, каждый из которых ведет себя как маленький электрический диполь. Все эти диполи име-

ют произвольную ориентацию. При температуре, превышающей *точку Кюри,* у кристаллитов нет дипольного момента.

Существует несколько механизмов, объясняющих, почему изменение температуры приводит к возникновению пироэлектричества. Изменение температуры может привести к удлинению или укорачиванию отдельных диполей. На ориентацию диполей может повлиять их возбуждение от повышения температуры. Эти явления получили название *первичного* пироэлектричества. Существует также *вторичное* пироэлектричество, которое в упрощенном виде можно считать следствием пьезоэлектрического эффекта (например, возникновение напряжения в материале из-за теплового расширения). На рисунок 3.19 показан пироэлектрический датчик, имеющий одинаковую температуру T_0 в любой точке объема. Будучи электрически поляризованными, диполи ориентированы так, что одна сторона материала становится положительно заряженной, а вторая — отрицательной. Однако в стационарных условиях свободные носители зарядов (электроны и дырки) нейтрализуют заряды, возникшие вследствие поляризации, и конденсатор, образованный электродами и пироэлектриком, разряжается (рисунок 3.16В), что приводит к появлению нулевого заряда на выходе датчика. Тепло на сенсор может поступать в виде теплового излучения, которое поглощается нижним электродом и распространяется по пироэлектрику, используя механизм теплопроводности. Нижний электрод иногда покрывают теплопоглощающим слоем из черненого золота или органического красителя. В результате поглощения тепла нижняя часть сенсора нагревается (его новая температура становится равной T_1), что приводит к его расширению, что, в свою очередь, вызывает изгиб датчика. Появившаяся деформация означает возникновение механического напряжения и, следовательно, изменение ориентации диполей. Поскольку материал сенсора также обладает и пьезоэлектрическими свойствами, его напряженное состояние приводит к появлению на электродах противоположных по знаку зарядов. Отсюда видно, что вторичный пироэлектрический эффект можно описать следующей последовательностью событий:

- ➔ тепловое излучение,
- ➔ поглощение тепла,

- ➔ механическое напряжение, индуцированное теплом,
- ➔ электрический заряд.

Дипольный момент M объемного пироэлектрического датчика можно найти по выражению:

$$M = \mu A h$$

`где μ — дипольный момент на единицу объема,

A — площадь датчика,

h — его толщина.

Заряд Q_a , собранный на электродах, приводит к появлению в материале следующего дипольного момента:

$$M_0 = Q_a h$$

M должен быть равен M_o, поэтому

$$Q_a = \mu A h$$

Поскольку температура меняется, дипольный момент тоже не остается постоянным, что и приводит к индуцированию заряда.

Количество поглощенного тепла можно выразить через изменение дипольного момента, при этом μ зависит как от температуры T_a, так и от приращения тепловой энергии ΔW , поглощенной материалом:

$$\Delta Q_a = A\mu(T_a, \Delta W)$$

На рисунке 3.20 показан пироэлектрический детектор, подсоединенный к резистору R_b, отображающему либо внутреннее сопротивление утечки, либо входное сопротивление интерфейсной схемы, подключенной к выходу датчика.

В правой части рисунка показана эквивалентная электрическая схема такого сенсора. Она состоит из следующих трех компонентов:

- источника тока i, приводящего к появлению тепла,
- емкости детектора C,
- сопротивления утечки R_b.

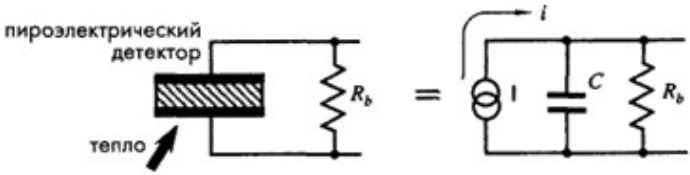

Рисунок 3.20 – Пироэлектрический детектор и его эквивалентная схема

Выходным сигналом пироэлектрического детектора в зависимости от конкретного применения может быть либо заряд (ток), либо напряжение.

Поскольку пироэлектрический датчик является конденсатором, он будет разряжаться через сопротивление R_b. Величина электрического тока через этот резистор и напряжение на нем соответствуют заряду, индуцированному тепловым потоком.

Пироэлектрический эффект характеризуется двумя коэффициентами [3,5]:

пироэлектрическим коэффициенту по заряду

$$P_Q = \frac{dP_S}{dT}$$

пироэлектрическим коэффициенту по напряжению

$$P_V = \frac{dE}{dT}$$

где P_s — спонтанная поляризация (или *электрический заряд),*
E — напряженность электрического поля,
Т— температура в Кельвинах.

Отношение двух коэффициентов можно выразить через диэлектрическую проницаемость ε_r и электрическую постоянную ε_0:

$$\frac{P_Q}{P_V} = \frac{dP_s}{dE} = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Поляризация зависит от температуры, и поэтому оба пироэлектрических коэффициента являются функциями температуры.

При воздействии источника тепла на пироэлектрик, его температура повышается на А Г, при этом происходят соответствующие изменения заряда и напряжения:

$$\Delta Q = P_Q A \Delta T \ ,$$

$$\Delta V = P_V h \Delta T \ .$$

Если емкость датчика выразить в следующем виде:

$$C_e = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{h}$$

из уравнений (3.78-3.80) можно вывести следующее соотношение:

$$\Delta V = P_Q \frac{A}{C_e} \Delta T = P_Q \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{h} \Delta T$$

Отсюда видно, что выходное напряжение датчика пропорционально росту температуры и пироэлектрическому коэффициенту по заряду и обратно пропорционально его толщине.

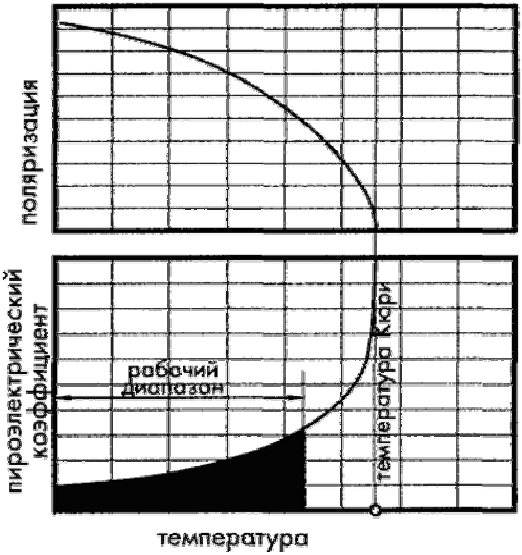

Рисунок 3.21 – Поляризация пироэлектрического кристалла

Когда пироэлектрический чувствительный элемент подвергается воздействию перепада температур, его поляризация (индуцируемый электрический заряд внутри кристалла) также меняется с температурой. На рисунке 3.21 показана типовая зависимость поляризации от температуры. Пироэлектрический коэффициент по напряжению P_V соответствует наклону кривой поляризации. Приближаясь к точке Кюри, этот коэффициент резко возрастает, что объясняется исчезновением поляризации и потерей пироэлектрических свойств в этом температурном диапазоне. Предполагается, что нелинейность кривой поляризации объясняется увеличением чувствительности датчика с ростом температуры.

При выборе пироэлектрического материала необходимо учитывать эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую, которую можно оценить по пироэлектрическо-

му коэффициенту связи k_p^2 (k_p является аналогом пьезоэлектрического коэффициента связи *к)*. Этот коэффициент показывает во сколько раз пироэлектрическая эффективность ниже предельного значения Карно $\Delta T / T_a$.

Для производства пироэлектрических датчиков используются различные материалы, например, танталат лития и пироэлектрические керамики. Довольно популярным стало применение полимерных пленок. В течение последних лет интенсивно разрабатывались технологии нанесения тонких пироэлектрических пленок.

На рисунке 3.22 показаны временные диаграммы, построенные для пироэлектрического датчика при подаче на его вход ступенчатой тепловой функции.

Из диаграмм видно, что электрический заряд достигает своего пикового значения практически мгновенно, а затем начинает уменьшаться с *тепловой постоянной времени* τ_T Это можно объяснить следующим образом: при нагреве поляризация первоначально происходит в самых поверхностных слоях кристаллического материала толщиной в нескольких атомов, температура которых мгновенно повышается до максимального значения. При этом в материалах возникает высокий градиент температур, вызывающий максимальную поляризацию. После чего происходит распространение тепла по всему пироэлектрику, часть которого поглощается его массой пропорционально значению теплоемкости С, а другая часть отдается в окружающую среду через тепловое сопротивление *R.* Все это приводит к уменьшению первоначального заряда. Тепловая постоянная времени определяется произведением теплоемкости датчика на его тепловое сопротивление:

$$\tau_T = CR = cAhR \ ,$$

где *c* — удельная теплоемкость чувствительного элемента.

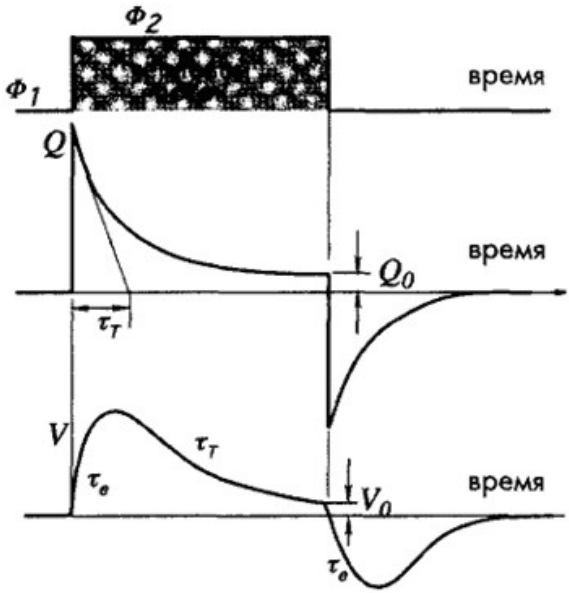

Рисунок 3.22 – Реакция пироэлектрического чувствительного элемента на тепловую ступенчатую функцию

Тепловое сопротивление R является функцией всех тепловых потерь в окружающую среду через конвекцию, теплопроводность и тепловое излучение. В низкочастотных устройствах желательно использовать датчики с большой тепловой постоянной времени, тогда как в быстродействующих системах (например, в измерителях лазерных импульсов) τ_T должно быть значительно ниже. Для уменьшения τ_T пироэлектрики иногда покрывают теплоотводами (кусочками алюминия или меди).

Предполагается, что на пироэлектрический датчик воздействует источник тепла, обладающий очень высокой теплоемкостью, поэтому его собственной теплоемкостью можно пренебречь. Тогда температура среды T_b во время проведения измерений считается постоянной, в то время как температура датчика

является функцией времени и определяется плотностью, удельной теплоемкостью и толщиной детектора.

Если входной тепловой поток имеет форму ступенчатой функции, а датчик работает в воздушной среде, для выходного тока можно записать следующее аппроксимационное выражение:

$$i = i_0 e^{-t/\tau_T}$$

где i_0 — пиковое значение тока.

На рисунке 3.22 показано, что заряд Q и напряжение V никогда не снижаются до нуля.

Рассмотрим почему так происходит.

Пироэлектрик получает тепловую энергию со стороны датчика a (рисунок 3.19), за счет которой увеличивается температура материала. Рост температуры приводит к скачку заряда в датчике, уменьшающегося с постоянной времени τ_T Однако датчик имеет еще одну сторону — b, контактирующую с более холодной средой, через которую происходит потеря тепловой энергии, т.е. охлаждение датчика. Поскольку стороны a и b чувствительного элемента подвергаются воздействию разной температуры, через пироэлектрик постоянно проходит тепловой поток. Электрический ток на выходе пироэлектрического датчика всегда повторяет форму теплового потока, проходящего через него. Проводя точные измерения, можно убедиться в том, что выходное напряжение пироэлектрического сенсора равно постоянному значению V_o, пропорциональному величине теплового потока.

Как и другие ферроэлектрические материалы PVDF также обладает пироэлектрическими свойствами, т.е. на его поверхности образуется электрический сигнал в ответ на изменение температуры. Пленки из PVDF сильно поглощают ИК лучи в диапазоне длин волн 7.. .20 мкм. Этот диапазон соответствует спектру длин волн, излучаемых человеческим телом. Однако, несмотря на то, что сами пленки из PVDF могут поглощать тепловое излучение, в пироэлектрических датчиках они располагаются между двумя тонкими электродами, которые ино-

гда довольно сильно отражают волны интересующего диапазона. В таких случаях электрод, расположенный ближе к источнику тепловых излучений, либо покрывают теплопоглощающим слоем, либо изготавливают из нихрома (сплава, обладающего высокой поглощающей способностью). На основе пленок из PVDF реализуют датчики перемещения людей, а также пироэлектрические датчики для более сложных устройств, таких как видеокамеры для ночного наблюдения и лазерные копировальные приборы. Не так давно была представлена ИК матрица на основе PVDF пленки, позволяющая идентифицировать отпечатки пальцев, использующая пироэффект, присущий полимерам.

3.5 Эффект Холла

Интегральные датчики магнитного поля в своём большинстве используют эффект Холла, открытый американским физиком Эдвином Холлом (E. Hall) в 1879 г.

Первоначально этот эффект применялся для изучения электропроводности металлов, полупроводников и других токопроводящих материалов. В настоящее время датчики Холла используются не только для обнаружения магнитных полей, но и определения положения и перемещения объектов [1,3,5,6].

Эффект Холла состоит в следующем. Предположим, что электроны двигаются внутри электропроводной пластины, помещенной в магнитное поле **B** . Если проводник с током помещён в магнитное поле, то возникает э.д.с., направленная перпендикулярно и току, и полю. Эффект Холла иллюстрируется на рисунке 3.23.

На две стороны пластины нанесены дополнительные электроды, подключенные к вольтметру. Еще два электрода расположены сверху и снизу пластины, они подсоединены к источнику электрического тока. По тонкой пластине полупроводникового материала протекает ток ***I***. Из-за действия внешнего магнитного поля возникает отклоняющая сила, смещающая электроны ближе к правому краю пластины, поэтому эта сторона становится более отрицательно заряженной, чем левая. Эта сила, сила Лоренца, искривляет траекторию движения электронов, что приводит к перераспределению объёмных зарядов в полупроводниковой пластине:

$$\mathbf{F} = qv\mathbf{B}$$

где $q = 1.6\text{x}10^{-19}$ Кл — величина заряда электрона,
v — его скорость,
$\boldsymbol{B}$ — магнитная индукция.

$\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{B}$ являются векторами. Направление силы и ее величина зависят от пространственного расположения магнитного потока и направления движения электрона. Единицей измерения $\boldsymbol{B}$ является тесла: 1 Тесла $\approx$ 1 Ньютон/(ампер х метр) $\approx 10^4$ Гаусс.

Таким образом, вследствие взаимодействия магнитного поля и электрического тока возникает *поперечная разность потенциалов,* получившая название *напряжение или э.д.с. Холла* E_h. Знак и амплитуда этого напряжения зависят как от величины, так и направления магнитного и электрического полей. Эта э.д.с. пропорциональна векторному произведению индукции $\boldsymbol{B}$ на плотность тока $\boldsymbol{j}$:

$$E_h = \frac{d}{qn}\left[\boldsymbol{B} \times \boldsymbol{j}\right]$$

где d –и ширина пластины,
q – заряд частицы-носителя,
n – концентрация носителей.

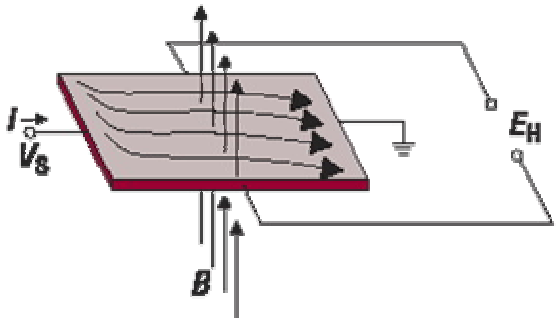

Рисунок 3.23 – Иллюстрация эффекта Холла

При снижении концентрации носителей э.д.с. Холла возрастает, поэтому в качестве материала для датчиков Холла предпочтительно использование таких полупроводников, как кремний, арсенид галлия и др. Для прямоугольной пластины с однородными током магнитным полем, направленными перпендикулярно пластине, как показано на рисунке 3.23, эта э.д.с. равна

$$E_h = k_h V_s B$$

где $\mathbf{k_н}$ – постоянная Холла, $\mathbf{V_S}$ – напряжение, создаваемое на токоподводящих выводах датчика Холла.

Для кремния $\boldsymbol{k_н}$ составляет величину по рядка 70 мВ/(В•Тл), поэтому, как правило, э.д.с. датчика Холла требуется усиливать.

При фиксированной температуре *напряжение Холла* также можно определить из выражения:

$$E_h = hi\mathrm{B}\sin\alpha$$

где а —угол между вектором магнитного поля и плоскостью пластины Холла (рисунок 3.24),
h — полная чувствительность датчика, на значение которой влияют тип материала пластины, ее геометрия (площадь активной зоны) и температура.

Полная чувствительность датчика Холла зависит от *коэффициента Холла,* который определяется градиентом поперечного электрического потенциала на единицу интенсивности магнитного поля и на единицу плотности тока. В соответствии с теорией свободных электронов в металлах, коэффициент Холла можно найти при помощи выражения:

$$H = \frac{1}{Ncq},$$

где N - число свободных электронов в единице объема,
с - скорость света.

В зависимости от кристаллической структуры материала заряды могут быть либо электронами (отрицательными), либо дырками (положительными).

Поэтому и эффект Холла бывает либо положительным, либо отрицательным.

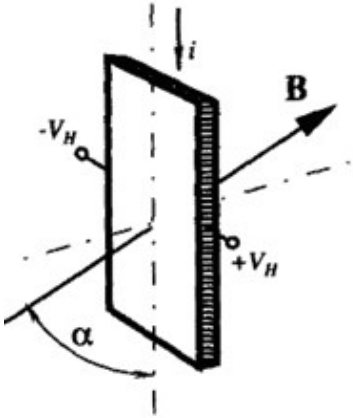

Рисунок 3.24 – Эффект Холла при произвольном положении вектора магнитной индукции

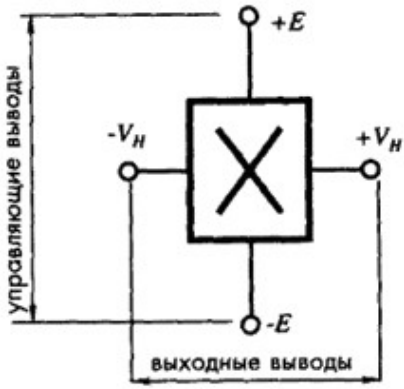

Рисунок 3.25 – Выводы датчика Холла

Линейный датчик Холла обычно размещается в корпусе с четырьмя выводами (рисунок 3.25). Два вывода для подключения тока управления называются *управляющими выводами,* а сопро-

тивление между ними — *сопротивлением управляющей цепи* R_i. Выводы для измерения выходного напряжения называются *дифференциальными выходами,* а сопротивление между ними — *выходным дифференциальным сопротивлением* R_o.

Большинство датчиков Холла изготавливаются из кремния, и их можно разделить на две основные категории:

простые,

интегрированные.

Для построения чувствительных элементов на основе эффекта Холла применяются InSb, InAs, Ge и GaAs. Кремниевые сенсоры могут быть интегрированы на одной подложке с интерфейсными электронными схемами. Такая интеграция особенно важна при построении прецизионных датчиков, поскольку напряжение Холла обычно довольно мало.

3.6 Использование звуковых волн

Звуковыми волнами называются периодические сжатия и расширения среды (твердых тел, жидкостей и газов), происходящие с определенной частотой. Компоненты среды совершают колебательные движения в направлении распространения волны, поэтому такие волны называются продольными механическими волнами. Название *звуковые* связано с диапазоном восприятия человеческого слуха, который приблизительно составляет интервал 20...20000 Гц. Продольные механические волны ниже 20 Гц называются *инфразвуковыми,* а выше 20 кГц — *ультразвуковыми [3,5,6].* Если бы классификация волн велась бы относительно других животных, например, собак, диапазон звуковых волн был бы значительно шире.

Детектирование инфразвуковых волн применяется при исследовании строительных конструкций, предсказании землетрясений и изучении других объектов, обладающих большими геометрическими размерами. Люди ощущают инфразвуковые волны большой амплитуды, даже если их не слышат, при этом у них появляются такие психологические явления, как паника, страх и т.д. Примерами волн звукового диапазона являются колебания струн (струнные музыкальные инструменты), вибрации столба воздуха (духовые музыкальные инструменты), звучание пластин

(некоторые ударные инструменты, голосовые связки, громкоговоритель). Какова бы ни была природа возникновения звуков, всегда происходит попеременное сжатие и разрежение воздуха, при этом волны распространяются во все стороны. Спектр звуковых волн может быть весьма различным: от простых однотонных звуков метронома и трубы органа до богатых мелодий скрипки. Шум, как правило, обладает очень широким спектром. Он может иметь равномерное распределение плотности или присутствовать только на частотах определенных гармоник.

На стадии сжатия среды ее объем изменяется от V до V-ΔV. Отношение изменения давления Δp к относительному изменению объема называется объемным модулем упругости среды:

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V / V} = \rho_0 v^2$$

где p_0 — плотность вне зоны сжатия, а v — скорость звука в среде. Отсюда скорость звука определяется следующим образом:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$$

Следовательно, скорость звука зависит от упругости ***(B)*** и инерционных свойств среды (p_0). Поскольку обе переменные являются функциями от температуры, скорость звука также зависит от температуры. Это свойство положено в основу акустических термометров.

Для твердых тел продольная скорость может быть определена через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона W:

$$v = \sqrt{\frac{E(1-W)}{\rho_0(1+W)(1-2W)}}$$

Следует отметить, что скорость звука зависит от температуры, что всегда должно учитываться при разработке конкретных датчиков.

Рассмотрим распространение звуковой волны в трубе органа, где каждый маленький объемный элемент воздуха совершает колебательные движения вокруг состояния равновесия. Для чистой гармоники смещение элементарного объема относительно состояния равновесия можно описать следующим выражением:

$$y = y_m \cos\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)$$

где x — положение равновесия, y — смещение от положения равновесия,
y_m— амплитуда, а λ — длина волны.

На практике бывает более удобно рассматривать изменение давления в звуковой волне:

$$\rho = (k\rho_0 v^2 y_m)\sin(kx - \omega t)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ - порядок волны, ω - угловая частота, а члены в первой круглой скобке соответствуют амплитуде p_m звукового давления. Следует отметить, что sin и cos в уравнениях указывают на то, что фазы волн смещения и давления различаются на 90°.

Давление в любой заданной точке среды не является постоянным. Разность между мгновенным и средним значениями давления называется *акустическим давлением P.* Во время распространения волны вибрирующие частицы воздуха совершают колебательные движения вокруг положения равновесия с мгновенной скоростью ξ. Отношение акустического давления и мгновенной скорости (не путать со скоростью волны!) называется акустическим импедансом:

$$Z = \frac{P}{\xi}$$

который является комплексной величиной, характеризующейся амплитудой и фазой.

Для идеальной среды (в которой нет потерь), ***Z*** — действительное число, связанное со скоростью волны соотношением:

$$Z = \rho_0 v$$

Интенсивность I звуковой волны определяется как мощность, переданная через единичную площадь. Также ее можно выразить через величину акустического импеданса:

$$I = P\xi = \frac{P^2}{Z}$$

Однако на практике звук чаще характеризуется не интенсивностью, а параметром *p,* называемым уровнем звука, определенным относительно стандартной интенсивности I_0=10^{-12}Вт/м^2:

$$\beta = 10 \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Такая величина I_0 выбрана потому, что она соответствует нижней границе слуха человеческого уха. Единицей измерения β является децибел (дБ), названный в честь Александра Белла. При I=I_0, β =0.

Уровни давления также могут быть выражены через децибелы:

$$\Pi = 20 \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

где p_0=2x10^{-5}Н/м^2 (0.0002 мкбар)=2.9x10^{-9} psi.

3.7 Эффекты Зеебека и Пельтье

В 1821 году физик Т. Зеебек (1770-1831), родившийся в Эстонии, а учившийся в Германии, изучая тепловые эффекты в гальванических устройствах, соединил полукруглые элементы, изготовленные из висмута и меди [4,5]. Неожиданно стрелка компаса, случайно лежавшего рядом, отклонилась (рис. 3.34А). Он проверил этот эффект на других соединениях металлов при разных температурах и обнаружил, что каждый раз получается

различная напряженность магнитного поля. Однако, Зеебек не догадался, что при этом через элементы течет электрический ток, поэтому назвал это явление термомагнетизмом.

Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи, составленной из разных проводников (M1 и M2), возникает термоэдс, если места контактов (A, B) поддерживаются при разных температурах [8]. Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (так называемый термоток I_T), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рисунок 3.26).

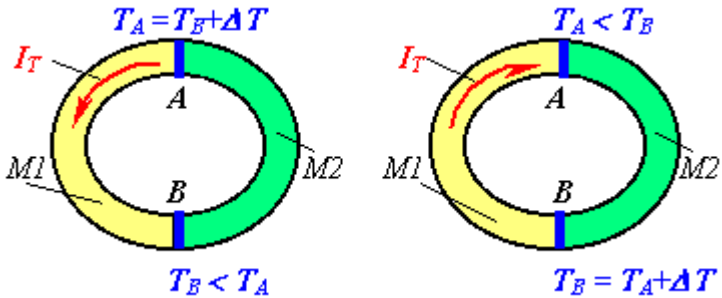

Рисунок 3.26 - Возникновение термоиндуцированного тока в двух спаянных проводниках при различных температурах контактов

Цепь, составленная из двух различных проводников (M1, M2), называется термоэлементом (или термопарой), а ее ветви - термоэлектродами.

Величина термоэдс (e_T) зависит от абсолютных значений температур спаев (T_A, T_B), разности этих температур DT и от природы материалов, составляющих термоэлемент.

Термоэдс контура определяется формулами:

$$de_T = a_{12} dT;$$

.

$$\varepsilon_T = \int_{T_B}^{T_A} \alpha_{12} dT$$

Здесь $\boldsymbol{a_{12}}$ - коэффициент термоэдс металла 1 по отношению к металлу 2, который является характеристикой обоих металлов термопары.

На практике это создает определенные неудобства. Поэтому условились величину $\boldsymbol{a}_{12}$ измерять по отношению к одному и тому же металлу, за который удобно принять свинец, т.к. для образца из свинца не возникает никакой разности потенциалов между его нагретым и холодным концами.

Значения коэффициентов термоэдс металлов М1 и М2 по отношению к свинцу обозначают соответственно $\boldsymbol{a_1}$ и $\boldsymbol{a_2}$ и называют абсолютными коэффициентами термоэдс.

Тогда $\boldsymbol{a_{12} = a_1 - a_2}$.

В небольшом интервале температур (во всяком случае, для интервала порядка 0°С - 100°С):

$$\boldsymbol{e_T = a_{12}\,(T_A - T_B) = a_{12}\,DT.}$$

Направление термотока определяется следующим образом: в нагретом спае ток течет от металла с меньшим значением $\boldsymbol{a}$ к металлу, у которого коэффициент термоэдс больше.

Например, для термопары железо (М1) - константан (М2) абсолютные коэффициенты термоэдс соответственно равны: a_1 = +15.0 мкВ/К (для железа) и a_2 = -38.0 мкВ/К (для константана). Следовательно, ток в горячем спае направлен от константана к железу (от М2 к М1). Именно эта ситуация (когда $a_2<a_1$) иллюстрируется для электрической цепи, изображенной на рисунке 3.26.

Коэффициент термоэдс определяется физическими характеристиками проводников, составляющих термоэлемент: концентрацией, энергетическим спектром, механизмами рассеяния носителей заряда, а также интервалом температур. В некоторых случаях при изменении температуры происходит даже изменение знака $\boldsymbol{a}$.

Термоэдс обусловлена тремя причинами:

1) температурной зависимостью уровня Ферми, что приводит к появлению контактной составляющей термоэдс;

2) диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному, определяющей объемную часть термоэдс;

3) процессом увлечения электронов фононами, который дает еще одну составляющую - фононную.

Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением концентрации носителей. В металлах концентрации свободных электронов очень велики и не зависят от температуры; электронный газ находится в вырожденном состоянии и поэтому уровень Ферми, энергия и скорости электронов также слабо зависят от температуры. Поэтому термоэдс "классических" металлов очень мала (порядка нескольких мкВ/К). Для полупроводников ***a*** может превышать 1000 мкВ/К.

Для сравнения, в таблице приведены значения ***a*** некоторых металлов (по отношению к свинцу) для интервала температур 0°С - 100°С (положительный знак ***a*** приписан тем металлам, к которым течет ток через нагретый спай).

Таблица 1

Металл	а, мкВ/К
Платина	-4.4
Олово	-0.2
Свинец	0.0
Серебро	+2.7
Медь	+3.2
Сурьма	+4.3

Приведенные данные не следует считать абсолютно достоверными, так как величина термоэдс зависит от чистоты материала и очень чувствительна к внешним механическим и химическим воздействиям.

Все термоэлектрические явления относятся к явлениям переноса и обусловлены электрическими или тепловыми пото-

ками, возникающими в среде при наличии электрических и тепловых полей. Причиной всех термоэлектрических явлений является то, что средняя энергия носителей в потоке отличается от средней энергии в состоянии равновесия.

Эффект Зеебека, как и другие термоэлектрические явления, имеет феноменологический характер.

Так как в электрических схемах и приборах всегда имеются спаи и контакты различных проводников, то при колебаниях температуры в местах контактов возникают термоэдс, которые необходимо учитывать при точных измерениях.

С другой стороны, термоэдс находит широкое практическое применение. Эффект Зеебека в металлах используется в термопарах для измерения температур. Что касается термоэлектрических генераторов, в которых тепловая энергия непосредственно преобразуется в электрическую, то в них используются полупроводниковые термоэлементы, обладающие гораздо большими термоэдс.

Наиболее важной технической реализацией эффекта Зеебека в металлах является термопара - термочувствительный элемент в устройствах для измерения температуры. Термопара состоит из двух последовательно соединенных пайкой или сваркой разнородных металлических проводников М1 и М2. В сочетании с электроизмерительными приборами термопара образует термоэлектрический термометр, шкала которого градуируется непосредственно в К или °С.

При измерении температуры один из контактов обычно термостатируется (обычно при 273 К - с помощью тающего льда).

Диапазон температур, измеряемых при помощи термопар, очень велик: от гелиевых, до нескольких тысяч градусов. В таблице 3.1 приведены материалы термоэлектродов, из которых обычно делаются термопары, используемые для разных температурных областей.

Таблица 3.1

Диапазон температур, К	Материалы термоэлектродов

4ё270	Золото - медь
70ё800	Медь - константан
220ё900	Хромель - копель
220ё1400	Хромель - алюмель
250ё1900	Платинородий - платина
300ё2800	Вольфрам - рений

В зависимости от назначения термопары бывают: стационарные и переносные, с влагонепроницаемой, взрывобезопасной, герметичной оболочкой и без нее, виброустойчивые и др.

С помощью явления Зеебека, помимо температуры, можно определять и другие физические величины, измерение которых может быть сведено к измерению температур: силы переменного тока, потока лучистой энергии, давления газа и т.д.

Для увеличения чувствительности термоэлементы соединяют последовательно в термобатареи (рисунок 3.27). При этом, все четные спаи поддерживаются при одной температуре, а все нечетные - при другой. Эдс такой батареи равна сумме термоэдс отдельных элементов.

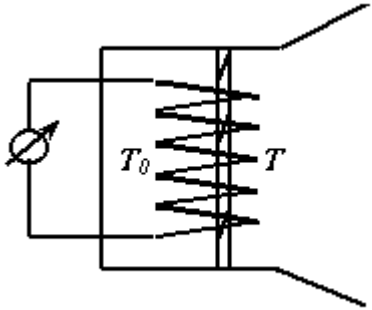

Рисунок 3.27 - Термобатарея

Миниатюрные термобатареи (так называемые термостолбики) с успехом применяют для измерения интенсивности света (как видимого, так и невидимого). В соединении с чувствительным гальванометром они обладают огромной чувствительно-

стью: обнаруживают, например, тепловое излучение человеческой руки.

Термобатарея представляет интерес и как генератор электрического тока. Однако использование металлических термоэлементов неэффективно, поэтому для преобразования тепловой энергии в электрическую используются полупроводниковые материалы.

Эффект Пельтье - *термоэлектрическое явление, обратное эффекту Зеебека: при пропускании электрического тока* ***I*** *через контакт (спай) двух различных веществ (проводников или полупроводников) на контакте, помимо джоулева тепла, происходит выделение дополнительного тепла Пельтье* $\boldsymbol{Q_P}$ *при одном направлении тока и его поглощение при обратном направлении [8].*

Величина выделяемого тепла Q_P и его знак зависят от вида контактирующих веществ, силы тока и времени его прохождения:

$$dQ_P = \pi_{12} \cdot I \cdot dt.$$

Здесь $\boldsymbol{p_{12} = p_1 - p_2}$ - коэффициент Пельтье для данного контакта, связанный с абсолютными коэффициентами Пельтье $\boldsymbol{p_1}$ и $\boldsymbol{p_2}$ контактирующих материалов. При этом считается, что ток идет от первого образца ко второму.

При выделении тепла Пельтье имеем: $\boldsymbol{Q_P>0,\ p_{12}>0,\ p_1>p_2}$.

При поглощении тепла Пельтье оно считается отрицательным и соответственно: $\boldsymbol{Q_P<0,\ p_{12}<0,\ p_1<p_2}$. Очевидно, что $\boldsymbol{p_{12} = - p_{21}}$.

Размерность коэффициента Пельтье $[p]_{СИ}$=Дж/Кл=В.

Вместо тепла Пельтье часто используют физическую величину, определяемую как тепловая энергия, ежесекундно выделяющаяся на контакте единичной площади. Эта величина, получившая название - мощность тепловыделения, определяется формулой:

$$q_P = \pi_{12} \cdot j,$$

где $j=I/S$ - плотность тока;
S - площадь контакта;
размерность этой величины $[q_P]_{СИ}$=Вт/м^2.

Из законов термодинамики вытекает, что коэффициент Пельтье и коэффициент термоэдс a связаны соотношением:

$$\pi=\alpha\cdot T,$$

где T - абсолютная температура контакта.

Коэффициент Пельтье, являющийся важной технической характеристикой материалов, как правило, не измеряется, а вычисляется по коэффициенту термоэдс, измерение которого более просто.

На рисунках 3.28 и 3.29 изображена замкнутая цепь, составленная из двух различных полупроводников ПП1 и ПП2 с контактами А и В.

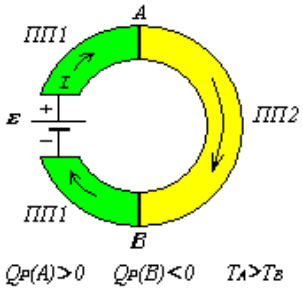

Рисунок 3.28 - Выделение тепла Пельтье (контакт А)

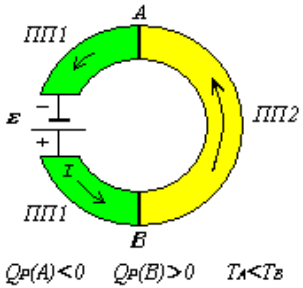

Рисунок 3.29 - Поглощение тепла Пельтье (контакт А)

Такую цепь, принято называть термоэлементом, а ее ветви - термоэлектродами. Через цепь течет ток ***I***, созданный внешним источником ***e***.

Рисунок 3.28 иллюстрирует ситуацию, когда на контакте А (ток течет от ПП1 к ПП2) происходит выделение тепла Пельтье $Q_P(A)>0$, а на контакте В (ток направлен от ПП2 к ПП1) его поглощение - $Q_P(B)<0$. В результате происходит изменение температур спаев: $T_A>T_B$.

На рисунке 3.29 изменение знака источника меняет направление тока на противоположное: от ПП2 к ПП1 на контакте А и от ПП1 к ПП2 на контакте В. Соответственно меняется знак тепла Пельтье и соотношение между температурами контактов: $Q_P(A)<0$, $Q_P(B)>0$, $T_A<T_B$.

Причина возникновения эффекта Пельтье на контакте полупроводников с одинаковым видом носителей тока (два полупроводника n-типа или два полупроводника p-типа) такая же, как и в случае контакта двух металлических проводников. Носители тока (электроны или дырки) по разные стороны спая имеют различную среднюю энергию, которая зависит от многих причин: энергетического спектра, концентрации, механизма рассеяния носителей заряда. Если носители, пройдя через спай, попадают в область с меньшей энергией, они передают избыток энергии кристаллической решетке, в результате чего вблизи контакта происходит выделение теплоты Пельтье ($Q_P>0$) и температура контакта повышается. При этом на другом спае носители, переходя в область с большей энергией, заимствуют недостающую энергию от решетки, происходит поглощение теплоты Пельтье ($Q_P<0$) и понижение температуры.

Эффект Пельтье, как и все термоэлектрические явления, выражен особенно сильно в цепях, составленных из электронных (n - тип) и дырочных (p - тип) полупроводников. В этом случае эффект Пельтье имеет другое объяснение. Рассмотрим ситуацию, когда ток в контакте идет от дырочного полупроводника к электронному (p ® n). При этом электроны и дырки движутся навстречу друг другу и, встретившись, рекомбинируют. В результате рекомбинации освобождается энергия, которая выделяется в виде тепла. Эта ситуация рассмотрена на рисунке 3.30, где изображены энергетические зоны (e_c - зона проводимо-

сти, e_v - валентная зона) для примесных полупроводников с дырочной и электронной проводимостью.

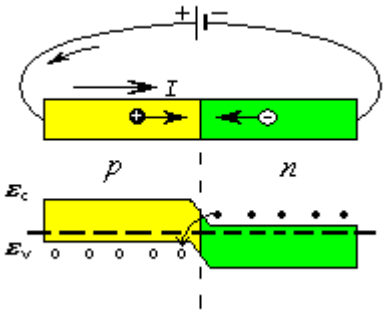

Рисунок 3.30 - Выделение тепла Пельтье на контакте полупроводников p и n – типа

На рисунке 3.31 (e_c - зона проводимости, e_v - валентная зона) иллюстрируется поглощение тепла Пельтье для случая, когда ток идет от n к p - полупроводнику (n ® p).

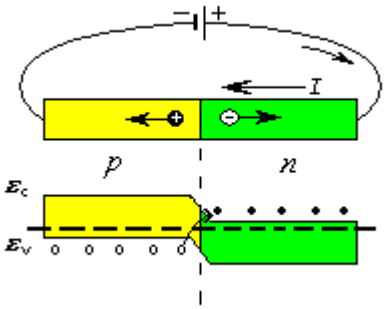

Рисунок 3.31 - Поглощение тепла Пельтье на контакте полупроводников p и n - типа

Здесь электроны в электронном и дырки в дырочном полупроводниках движутся в противоположные стороны, уходя от границы раздела. Убыль носителей тока в пограничной области

восполняется за счет попарного рождения электронов и дырок. На образование таких пар требуется энергия, которая поставляется тепловыми колебаниями атомов решетки. Образующиеся электроны и дырки увлекаются в противоположные стороны электрическим полем. Поэтому пока через контакт идет ток, непрерывно происходит рождение новых пар. В результате в контакте тепло будет поглощаться.

Для того, чтобы эффект Пельтье был заметен на фоне общего разогрева, связанного с выделением тепла Джоуля-Ленца, необходимо выполнение условия: $|Q_P| \geq Q_{Дж}$.

В результате получаются следующие соотношения, которые необходимо учитывать при проведении экспериментов:

$$I \leq \frac{\pi_{12}}{R};\ j \leq \frac{\pi_{12}}{l\rho}.$$

где $\boldsymbol{R}$ - сопротивление участка термоэлектрода длины $\boldsymbol{l}$, на котором происходит выделение тепла;
$\boldsymbol{r}$ - удельное электросопротивление.

Коэффициент Пельтье, определяющий количество тепла Пельтье, выделяющегося на контакте, зависит от природы контактирующих веществ и температуры контакта:

$$p_{12}=a_{12}\cdot T=(a_1-a_2)\cdot T,$$

где a_1 и a_2 абсолютные коэффициенты термоэдс контактирующих веществ.

Если для большинства пар металлов коэффициент термоэдс имеет порядок 10^{-5} - 10^{-4} В/К, то для полупроводников он может оказаться гораздо больше (до 1.5?10^{-3} В/К). Для полупроводников с разным типом проводимости α имеет разные знаки, вследствие чего

$$|\alpha_{12}|=|\alpha_1|+|\alpha_2|.$$

Необходимо отметить, что коэффициент термоэдс сложным образом зависит от состава и температуры полупроводника, при этом, по сравнению с металлами температурная зависимость а для полупроводников выражена значительно сильнее. Знак а определяется знаком носителей заряда. Не существует общих эмпирических, и тем более, теоретических формул, кото-

рые охватывали бы термоэлектрические свойства полупроводников в широком интервале температур. Обычно термоэлектродвижущая сила а полупроводника, начиная со значения а=0 при Т=0, растет сначала пропорционально Т, затем более замедленно, часто остается постоянной в некотором интервале температур, а в области высоких температур (более 500К - 700К) начинает убывать по закону а~1/Т.

Другой отличительной чертой полупроводников является определяющая роль примесей, введение которых позволяет не только во много раз изменять величину, но и менять знак а.

В полупроводниках со смешанной проводимостью вклады в термоэдс дырок и электронов противоположны, что приводит к малой величине а и р.

В частном случае, когда концентрации (n) и подвижности (u) электронов и дырок равны ($n_e = n_p$ и $u_e = u_p$) величины а и р обращаются в ноль:

$$\alpha \sim (n_e u_e - n_p u_p) / (n_e u_e + n_p u_p).$$

Эффект Пельтье, как и другие термоэлектрические явления имеет феноменологический характер.

Эффект Пельтье в полупроводниках используется для термоэлектрического охлаждения и подогрева, что находит практическое применение при термостатировании и в холодильных устройствах.

Основные направления практического использования эффекта Пельтье в полупроводниках: получение холода для создания термоэлектрических охлаждающих устройств, подогрев для целей отопления, термостатирование, управление процессом кристаллизации в условиях постоянной температуры.

Термоэлектрический метод охлаждения обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами охлаждения. Термоэлектрические устройства отличаются простотой управления, возможностью тонкого регулирования температуры, бесшумностью, высокой надежностью работы. Основной недостаток термоэлектрических устройств - малая величина эффек-

тивности, что не позволяет их использовать для промышленного получения «холода».

Термоэлектрические охлаждающие устройства применяются в бытовых и транспортных холодильниках, термостатах, для охлаждения и термостатирования термочувствительных элементов радиоэлектронной и оптической аппаратуры, для управления процессом кристаллизации, в медико-биологических приборах и т.д.

Контрольные вопросы

10. Опишите особенности емкости, которые позволяют применять ее для измерений в датчиках
11. Приведите основные схемы использования емкости в датчиках.
12. Приведите основные выражения, которые позволяют применять емкость в датчиках для измерения значений физических переменных.
13. Опишите особенности поведения сопротивления, которые позволяют применять его для измерений в датчиках
14. Приведите основные схемы использования сопротивления в датчиках.
15. Приведите основные выражения, которые позволяют применять сопротивление в датчиках для измерения значений физических переменных.
16. Что такое тензоэффект и его использование в тензорезисторных датчиках?
17. Опишите особенности пьезоэлектрического эффекта, которые позволяют применять его для измерений в датчиках
18. Приведите основные схемы использования пьезоэлектрического эффекта в датчиках.
19. Приведите основные выражения, которые позволяют применять пьезоэлектрический эффект в датчиках для измерения значений физических переменных.
20. Опишите особенности пироэлектрического эффекта, которые позволяют применять его для измерений в датчиках
21. Приведите основные схемы использования пироэлектрического эффекта в датчиках.
22. Приведите основные выражения, которые позволяют при-

менять пироэлектрический эффект в датчиках для измерения значений физических переменных.
23. Опишите особенности акустических волн и приведите основные соотношения, которые позволяют измерять параметры акустического давления с применением датчиков.
24. Опишите особенности эффекта Холла, которые позволяют применять его для измерений в датчиках
25. Приведите основные схемы использования эффекта Холла в датчиках.
26. Приведите основные выражения, которые позволяют применять эффект Холла в датчиках для измерения значений физических переменных.
27. Опишите особенности эффектов Зеебека и Пельтье, которые позволяют применять их для измерений в датчиках
28. Приведите основные схемы использования эффектов Зеебека и Пельтье в датчиках.
29. Приведите основные выражения, которые позволяют применять эффекты Зеебека и Пельтье в датчиках для измерения значений физических переменных.

Литература

1. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. – 96с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320с.
3. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем. – М.: Мир. – Кн.1, 1992.-480с.
4. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем. – М.: Мир. – Кн.2, 1992.-460с.
5. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, 2005.-592с.

6. Коптев Ю.Н. и др. Датчики теплофизических и механических параметров, Справочник. Том 1, Книга 1. – М.: 2000 г. - 400 с.
7. The International System of Units (SI). B.N. Taylor, ed., NIST Special Publication 330,2001.
8. http://www.effects.ru/

КЛЕВЦОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ПРИНЦИПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДАТЧИКАХ СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Часть 1

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.
Редактор
Корректор

ЛР №020565 от 23 июня 1997г. Подписано к печати
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Офсетная печать. Ус. п.л. – 5,9. Уч.- изд.л. – 6,0.
Заказ № Тираж экз.
"С"

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1