

Ю.В. Волков

**ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Ю.В. Волков

**ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

УДК 621.1/3 (075)

ББК 31.3я7

В 678

Волков Ю.В.

Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 89 с.: ил. 64. – ISBN 978-5-91646-188-6

В учебном пособии рассмотрены датчики, используемые в измерительных приборах при производстве электрической и тепловой энергии. В основу структуры пособия положена классификация датчиков по виду измерительного сигнала. Содержание материала в краткой и доступной форме знакомит с физическими эффектами, составляющими основу принципов преобразования датчиков.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 13.04.01 “Теплоэнергетика и теплотехника”. Может представлять интерес для специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией автоматизированных систем контроля и управления, а также для преподавателей, аспирантов и студентов технических высших учебных заведений.

Рецензенты: директор мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных устройств СПбНИУ ИТМО, д-р техн. наук, профессор И.В. Баранов;
заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент С.Н. Смородин.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-188-6

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2019

© Волков Ю.В., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 5 |
| 1. О классификации датчиков..... | 7 |
| 2. Датчики перемещения (механические)..... | 10 |
| 2.1. Резистивные датчики..... | 10 |
| 2.1.1. Контактные датчики..... | 11 |
| 2.1.2. Реостатные датчики..... | 13 |
| 2.2. Емкостные датчики..... | 16 |
| 2.2.1. Датчики с изменяемым зазором..... | 17 |
| 2.2.2. Датчики с изменяемой площадью..... | 17 |
| 2.2.3. Датчики с изменяемой диэлектрической проницаемостью..... | 17 |
| 2.3. Электромагнитные датчики..... | 20 |
| 2.3.1. Индуктивные датчики..... | 21 |
| 2.3.2. Трансформаторные датчики..... | 26 |
| 2.3.3. Вращающиеся трансформаторы..... | 29 |
| 3. Датчики деформации..... | 33 |
| 3.1. Тензорезистивные датчики..... | 33 |
| 3.2. Пьезоэлектрические датчики..... | 35 |
| 3.3. Магнитоупругие датчики..... | 37 |
| 3.3.1. Датчики дроссельного типа..... | 37 |
| 3.3.2. Трансформаторные датчики..... | 38 |
| 3.3.3. Шунтовые датчики..... | 38 |
| 3.3.4. Дифференциально-трансформаторные датчики..... | 39 |
| 3.3.5. Прессдукторы..... | 39 |
| 4. Оптические датчики..... | 41 |
| 4.1. Фотоэлементы..... | 42 |
| 4.2. Фоторезисторы..... | 44 |
| 4.3. Фотодиоды..... | 45 |
| 5. Датчики магнитного поля..... | 48 |
| 5.1. Датчики Виганда..... | 48 |
| 5.2. Датчики Холла..... | 50 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.3. | Магниторезистивные датчики | 51 |
| 5.4. | Индукционные датчики..... | 53 |
| 5.4.1. | Датчики с подвижной катушкой | 54 |
| 5.4.2. | Датчики с неподвижной катушкой | 55 |
| 5.5. | Сверхпроводниковые датчики..... | 56 |
| 6. | Датчики концентрации..... | 59 |
| 6.1. | <i>pH</i> -метры..... | 61 |
| 6.2. | Электрохимические резистивные датчики (кондуктометрические) | 65 |
| 6.2.1. | Контактные кондуктометрические датчики | 65 |
| 6.2.2. | Бесконтактные кондуктометрические датчики..... | 66 |
| 7. | Датчики температуры..... | 69 |
| 7.1. | Термометры расширения | 70 |
| 7.1.1. | Металлические термометры расширения | 70 |
| 7.1.2. | Жидкостные термометры расширения | 72 |
| 7.2. | Термометры давления | 73 |
| 7.3. | Терморезистивные термометры | 75 |
| 7.3.1. | Термометры сопротивления..... | 75 |
| 7.3.2. | Термисторы | 76 |
| 7.4. | Термоэлектрические термометры | 78 |
| 7.5. | Пирометры..... | 83 |
| 7.5.1. | Яркостные пирометры | 83 |
| 7.5.2. | Цветовые пирометры..... | 84 |
| 7.5.3. | Радиационные пирометры | 86 |

Истинный путь, ведущий длинным, но зато верным способом к теоретическому пониманию сложных явлений, состоит в опыте и измерении отдельных частных сложного явления.

Дм. И. Менделеев

Введение

Измерение – это ступень в системе эмпирического познания, и оно требует особой технологии – приборного инструментария и достаточно сложных процедурных методик.

Основными элементами средств измерений являются датчики.

Надлежащий выбор датчика и правильное построение измерительного канала означают, что в сигнал не вносятся дополнительные погрешности или ограничения сверх тех, которые были ему присущи изначально. Следовательно, от высокого качества преобразования в первую очередь зависят как точное соответствие между истинным значением измеряемой величины и значением, полученным при измерениях, так и пределы вносимых в полученную величину погрешностей.

Измерения в теплоэнергетике и теплотехнике основаны на значительной совокупности различных физических принципов. Соответственно, специалист, проводящий измерения, должен обладать широкими познаниями в различных отраслях знания. Конечно, можно обращаться к специальной литературе, однако объем информации настолько велик, что придется потратить значительное количество времени, чтобы разобраться в этом многообразии.

Это обстоятельство привело к мысли о создании пособия, которое в краткой и доступной форме дает возможность ознакомиться с физическими эффектами, составляющими основу принципов преобразования различных датчиков.

Автор не стремился к энциклопедическому изложению материала. Сознательно, с целью снижения объема материала там, где это не идет в ущерб пониманию принципов работы, опущено подробное описание характеристик. Уравнения приведены лишь там, где без них не обойтись, без выводов, описаны только их применение и ограничения, что важнее всего с практической точки зрения. Автор надеется, что усилия, затраченные им на написание пособия, позволят всем, кому оно адресовано, сэкономить их время.

1. О классификации датчиков

Датчик – первичный преобразователь, элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину (давление, температуру, частоту, скорость, перемещение, напряжение, электрический ток и т.п.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы [1].

Датчик – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем [2].

Датчик, чувствительный элемент, первичный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует материальный объект или явление, являющееся носителем величины, подлежащей измерению [3].

В чувствительном элементе с помощью определенного физического эффекта измеряемая величина преобразуется в сигнал, поступающий в последующую измерительную цепь. Другими словами, все датчики реализуют тот или иной принцип измерений.

Принцип измерения – явление материального мира¹, положенное в основу измерения [3].

Датчики обычно классифицируют по различным признакам:

1) **по виду измеряемой величины** различают датчики давления, рас-

¹ Атрибутами материи, всеобщими формами её бытия являются движение, пространство и время, которые не существуют вне материи. Точно так же не может быть и материальных объектов, которые не обладали бы пространственно-временными свойствами (Материя. БСЭ. 3-е изд. Т.15. С. 503).

хода, уровня, температуры, концентрации, перемещения, положения, оптические, вибрации и т.д.

2) **по способу преобразования** (физическому эффекту) выделяют несколько групп датчиков – резистивные, емкостные, электромагнитные, пьезоэлектрические, термоэлектрические, оптоэлектрические и т.п.

3) **по виду выходной величины**, в которую преобразуется входная величина, различают неэлектрические и электрические датчики. Большинство датчиков являются электрическими.

4) **по типу выходного сигнала** различают три класса датчиков:

– аналоговые датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины;

– цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или цифровой код;

– бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: "включено/выключено" (иначе, 0 или 1).

5) **по принципу действия** датчики разделяют на два класса: генераторные (пассивные) и параметрические (активные, или датчики-модуляторы). Генераторные датчики не нуждаются в дополнительном источнике энергии. И в ответ на изменение воздействия измеряемой величины на их выходе всегда появляется электрический сигнал. Параметрические датчики для своей работы требуют внешней энергии (источник питания), называемой сигналом возбуждения. Воздействие измеряемой величины изменяет параметры сигнала возбуждения (сопротивление R , емкость C , индуктивность L и т.д.), [4].

Представленные классификации датчиков приведены для подтверждения тезиса о большом их разнообразии. Что собственно и отражено в научных, учебных и специальных изданиях. Разумеется, использование того или иного классификационного признака – это дело исследователя, в зависимости от поставленной задачи.

Однако анализ существующих подходов показывает, что отсутствует или представлен в очень урезанном виде анализ датчиков по вполне очевидному классификационному признаку – по виду измерительного сигнала. Иногда этот признак путают с измеряемой величиной, что не одно и то же. Например, датчики давления или вибрации, у которых измерительным сигналом может служить деформация.

Поэтому содержание предлагаемого издания автор попытался оформить в структуре, соответствующей классификационному признаку – ***по виду измерительного сигнала***.

Исключением от принятой классификации стал раздел 7 «Датчики температуры» в силу того, что температура не может быть измерена непосредственно и вследствие этого измерительные сигналы могут быть различными. Тем не менее, учитывая важность измерения этой величины в теплоэнергетике и теплотехнике, а также то, что датчики температуры стоят обособленно в своих классификационных подгруппах, автор счел необходимым включение этого раздела в предлагаемое пособие.

2. Датчики перемещения (механические)¹

Перемещение (в механике) – вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени [5, т.3, с. 562].

Датчик перемещения (механический) — это устройство, предназначенное для определения линейного или углового положения контролируемого объекта, жестко связанного с чувствительным элементом, посредством преобразования изменения его положения в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

По способу преобразования датчики перемещения (механические) наиболее часто подразделяют на следующие виды:

- резистивные;
- емкостные;
- электромагнитные.

2.1. Резистивные датчики

Резистивные датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **электрического сопротивления** резистора от измеряемого **механического перемещения** объекта.

В зависимости от назначения резистивные датчики разделяют на контактные и реостатные.

¹ Датчиками перемещений могут быть устройства, основанные на многих известных принципах работы. Поэтому акцент сделан на тех, где присутствует жесткая механическая связь между измеряемым объектом и чувствительным элементом.

2.1.1. Контактные датчики

В контактных датчиках **механическое перемещение** объекта преобразуется в замкнутое или разомкнутое **состояние контактов**, управляющих электрической цепью.

На рис. 1 изображена принципиальная схема простейшего контактного датчика с одной парой контактов — **однопредельного**.

Замыкание контактов 1 и 2 происходит в результате изменения размера изделия I . Если размер изделия I увеличится, то измерительный щуп 3 переместится вверх, в результате чего контакты 1 и 2 придут в соприкосновение. При этом активное сопротивление между контактами 1 и 2 изменится от бесконечности до ничтожно малой величины, определяемой значением контактного сопротивления. Выводы a и b подключаются к сигнальному устройству. Пружинка 4 соединяет измерительный щуп 3 с выводом b .

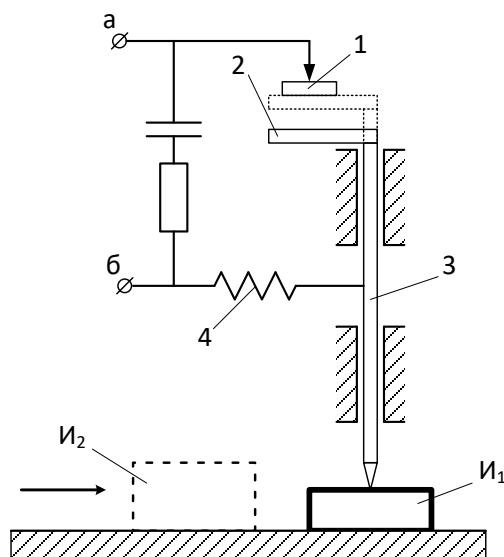


Рис. 1. Принципиальная схема однопредельного контактного датчика

На рис. 2 изображена принципиальная схема двухпредельного контактного датчика с двумя парами контактов, способного реагировать на перемещение щупа в обе стороны от начального («нулевого») положения.

Многopредельный контактный датчик с несколькими парами контактов показан на рис. 3.

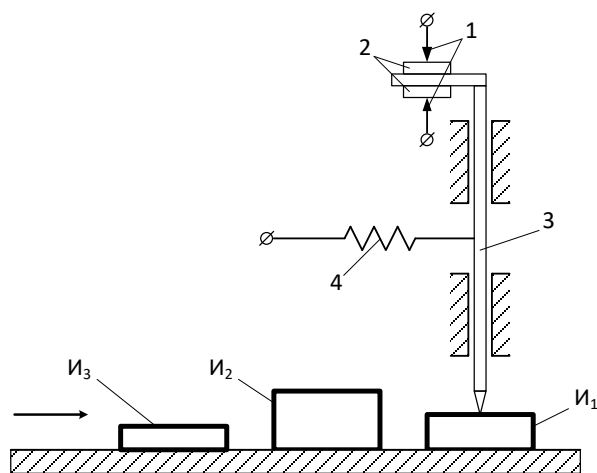


Рис. 2. Принципиальная схема двухпредельного контактного датчика

Контакты 1, 1', 1'' замыкаются последовательно друг за другом в зависимости от размеров деталей. Стрелка измерительного прибора, включенного на выходе датчика, покажет три размера.

Иногда контактные датчики могут работать либо на замыкание (или на размыкание) всей цепи, либо на замыкание части одного из сопротивлений резистора R цепи (рис. 4).

Выбор материала для контактов определяется исходя из контактного давления. Так, для высокочувствительных маломощных контактных датчиков давление на контактах изменяется в пределах от 0,001 до 0,02 Н. Для мощных контактных датчиков давление колеблется в пределах от 0,5 до 1 Н. При значительных контактных давлении

(1...3,5 Н) контакты выполняются из вольфрама, молибдена или их сплавов, которые обладают большой твердостью и не подвергаются разрушению. При малых контактных давлениях (0,01...0,02 Н) контакты изготавливаются из платины и золота, которые почти не окисляются в нормальных атмосферных условиях. Однако их износоустойчивость и твердость невелики. При контактных давлениях 0,05...1 Н применяют серебряные контакты. Высокой твердостью и устойчивостью против коррозии обладают контакты из родия.

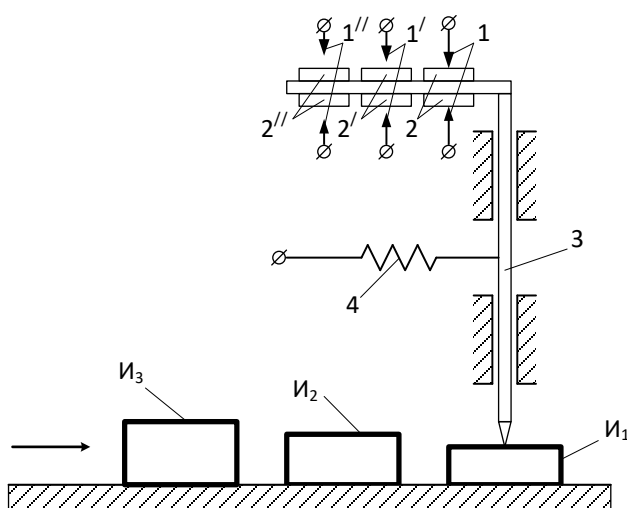


Рис. 3. Принципиальная схема многопредельного контактного датчика

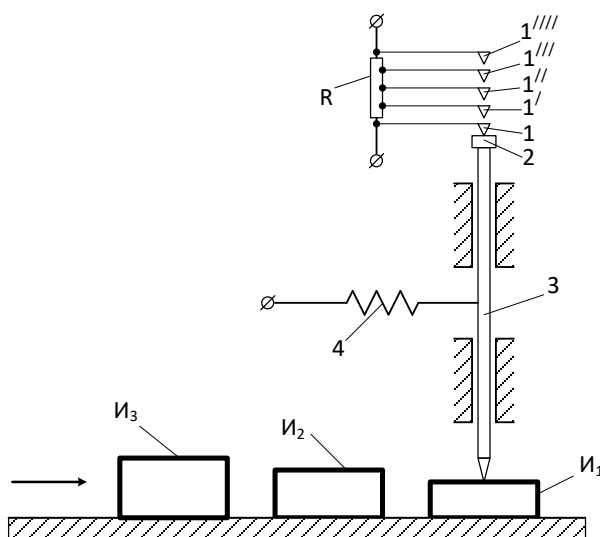


Рис. 4. Принципиальная схема многопредельного контактного датчика, замыкающего часть сопротивления

Достоинства контактных датчиков:

- простота и дешевизна;
- простота регулировки чувствительности;
- возможность работы на постоянном и переменном токе;
- возможность контролирования размеров деталей с очень высокой точностью (менее 1 мкм).

Недостатки контактных датчиков:

- наличие электрической дуги и искрения на контактах, что снижает надежность их работы;
- возможность получения ложных срабатываний в цепи сигнала при наличии вибраций или резких сотрясений установок.

Контактные датчики широко применяются в системах автоматического контроля и сортировки размеров, а также в системах автоматической сигнализации различных физических величин.

2.1.2. Реостатные датчики

В реостатных (потенциометрических) датчиках **механическое перемещение** преобразуется в изменение **электрического сопротивления** цепи.

Реостатный датчик представляет собой резистор с переменным сопротивлением, который может быть включен по схеме реостата (рис. 5) или по схеме потенциометра (рис. 6).

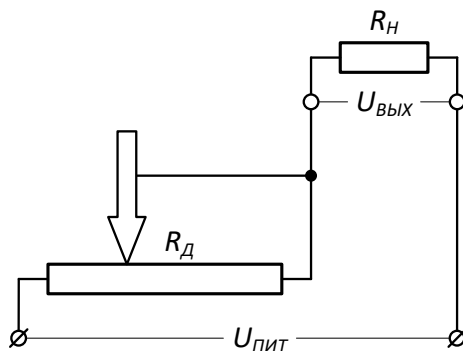


Рис. 5. Реостатное включение реостатного датчика

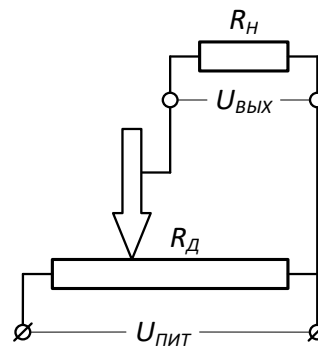


Рис. 6. Потенциометрическое включение реостатного датчика

На рис. 7 изображена принципиальная схема реостатного датчика для измерения линейных перемещений.

Он представляет собой устройство из тонкого изолированного провода 2 с высоким удельным сопротивлением, навитым в один ряд на плоский, цилиндрический или кольцевой каркас 3 из изолирующих диэлектрических материалов.

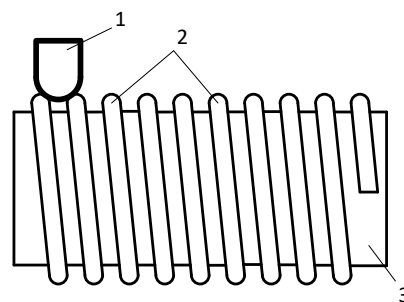


Рис. 7. Принципиальная схема реостатного датчика

По частично очищенной от изоляции 4 поверхности витков провода 2 скользит движок 1, схема перемещения которого показана на рис. 8.

При перемещении движка его изогнутый конец, прежде чем сойти с предыдущего витка провода, касается следующего витка, вследствие чего в момент перехода с витка на виток контакт не нарушается.

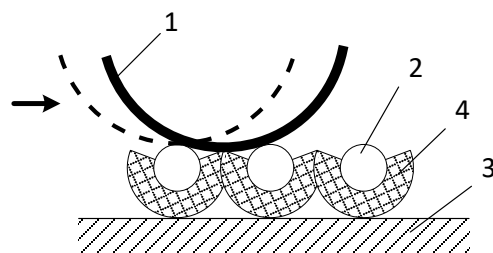


Рис. 8. Схема перемещения движка реостата

При перемещении подвижного контакта под воздействием контролируемой величины происходит изменение сопротивления датчика. Следует отметить, что датчик в виде простого реостата почти не нашел применения вследствие значительной нелинейности его характеристики.

На рис. 9 изображена принципиальная схема реостатного датчика для измерения угловых перемещений. Он состоит из каркаса 3 с обмоткой 1, по которой ходит движок 2 с подвижным контактом 4.

Принцип действия его основан на том, что в зависимости от угла поворота в подвижной части датчика меняется соотношение сопротивлений плеч.

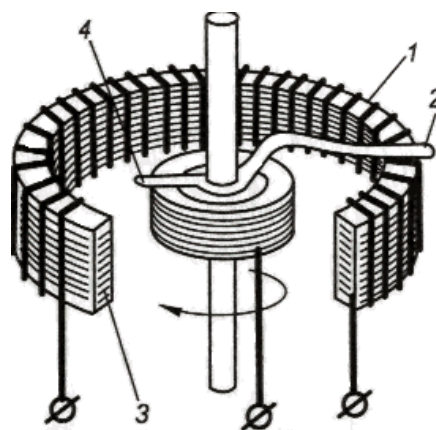


Рис. 9. Принципиальная схема реостатного датчика для измерения угловых перемещений

Реверсивные реостатные датчики применяются в тех случаях, когда контролируемая величина должна изменяться не только по абсолютному значению, но и по направлению (знаку).

На практике чаще других используются константан, нихром и манганин, обладающие низкой стоимостью, высоким удельным сопротивлением, обеспечивающим высокую точность измерения, и широким температурным диапазоном. Кроме того, эти материалы стойки к износу и коррозии, что обеспечивает хороший контакт с движком.

Щетки выполняют в виде проволок, лент или роликов из бронзы, серебра, платиноиридиевого сплава и других упругих материалов. Провод реостата должен быть покрыт эмалью или слоем окислов, изолирующих витки друг от друга. Вдоль траектории движка изоляция счищается, а сам провод полируется.

Основные достоинства реостатных датчиков:

- простота конструкции;
- возможность получения прямолинейной характеристики;
- отсутствие необходимости последующего усиления (если они применяются для целей измерения).

Основные недостатки:

- низкая надежность из-за наличия скользящего электрического контакта;
- подгорание контактов;
- относительно большое перемещение движка и большое усилие для его перемещения.

Реостатные датчики применяются для измерения больших перемещений (десятки миллиметров) с точностью до 0,1 мм. В автоматических системах движок реостата может быть механически связан с суппортом, клапаном или другим подвижным элементом, положение которого требуется измерять и передавать в виде электрического сигнала. При перемещении элемента перемеща-

ется и движок, вызывая изменение тока и напряжения в цепи. Чем сильнее движок прижимается к обмотке, тем надежнее контакт, но больше усилие, требуемое для перемещения движка. Это вызывает определенные трудности при конструировании измерительного прибора, так как усилие, развиваемое чувствительными элементами (мембранами, поплавками и т.п.), часто невелико.

2.2. Емкостные датчики

Емкостные датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых состоит в зависимости **емкости** конденсатора от измеряемого **перемещения** объекта.

Емкость (электрическая) – характеристика проводника, мера его способности накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора измеряется в *фарадах*¹.

Принцип действия емкостных датчиков основан на свойстве конденсатора изменять емкость с изменением геометрических размеров или диэлектрической постоянной.

Конденсатор в цепи постоянного тока может проводить ток в момент включения его в цепь (происходит зарядка или перезарядка конденсатора), по окончании переходного процесса ток через конденсатор не течёт, так как его обкладки разделены диэлектриком. В цепи же переменного тока он проводит колебания переменного тока посредством циклической перезарядки конденсатора, замыкаясь так называемым *током смещения*².

Для емкостного датчика входными величинами могут быть:

¹ 1 фарад равен емкости конденсатора, при которой заряд 1 кулон создает между его обкладками напряжение 1 вольт.

² Ток смещения, или абсорбционный ток — величина, прямо пропорциональная скорости изменения электрической индукции.

- **зазор** между обкладками;
- **площадь** перекрытия обкладок;
- **диэлектрическая проницаемость**.

2.2.1. Датчики с изменяемым зазором

В емкостных датчиках с изменяемым зазором **емкость** изменяется в зависимости от **зазора** между обкладками.

Датчик представляет собой конденсатор, одна из обкладок которого испытывает поперечное смещение или угловое разведение относительно другой, вызывая изменение емкости (рис. 10).

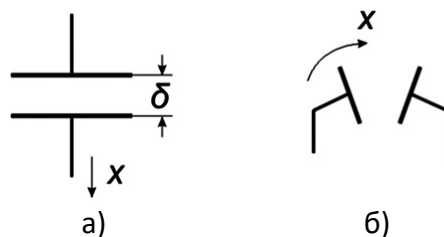


Рис. 10. Принципиальная схема емкостного датчика с изменяемым зазором между обкладками: а) плоский с поперечным движением обкладок; б) плоский с угловым движением обкладок

2.2.2. Датчики с изменяемой площадью

В емкостных датчиках с изменяемой площадью перекрытия обкладок **емкость** изменяется в зависимости от **площади** перекрытия обкладок.

Датчик представляет собой конденсатор, одна из обкладок которого испытывает продольное или угловое смещение относительно другой, вызывая изменение емкости (рис. 11).

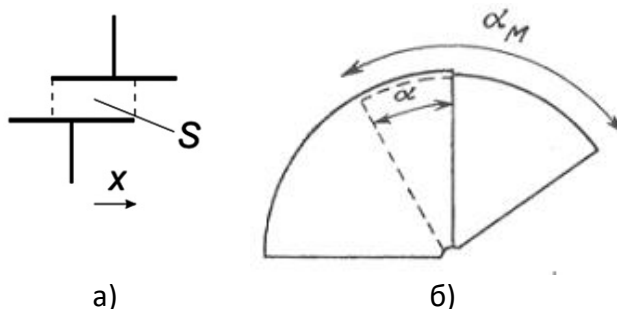


Рис. 11. Принципиальная схема емкостных датчиков с изменяемой площадью перекрытия обкладок: а) плоский с подвижной обкладкой; б) датчик угловых перемещений

2.2.3. Датчики с изменяемой диэлектрической проницаемостью

В емкостных датчиках с изменяемой диэлектрической проницаемостью

емкость изменяется в зависимости от **диэлектрической проницаемости диэлектрика**.

Датчик представляет собой конденсатор, в котором обкладки и диэлектрик испытывают взаимное смещение и/или диэлектрик изменяет свои свойства (температуру, влажность и т.п.), вызывая изменение емкости (рис. 12).

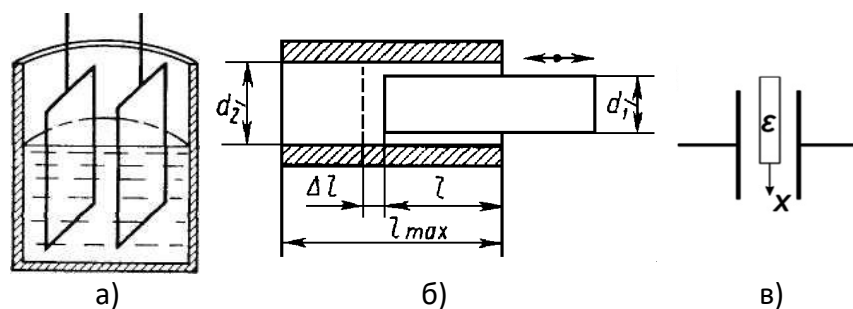


Рис. 12. Принципиальная схема емкостных датчиков с изменяемой диэлектрической проницаемостью: а) емкостный датчик уровня; б) цилиндрический с подвижной обкладкой; в) плоский с подвижным диэлектриком

Емкостные датчики могут быть однополярными (в их состав входит только один конденсатор), дифференциальными (в их состав входят два конденсатора) или мостовыми (здесь уже используются четыре конденсатора).

Для изготовления обкладок конденсаторов используется тонкая металлическая фольга примерно 5...6 мкм или выше (алюминиевая, медная, свинцово-оловянная) или тонкие слои металла, нанесенные металлизацией (цинк, алюминий, серебро и др.), толщина слоя от нескольких микрон до 0,01...0,1 мкм.

Диэлектрики разделяют на пять основных групп:

- слюда, стекло, керамика с низкими потерями и т.п.;
- керамика с высокой диэлектрической проницаемостью;
- бумага и металлизированная бумага;
- оксидные пленки (в электролитах);
- пленочные диэлектрики, такие, как полистирол, полиэтилентерефталат (майлар), политетрафторэтилен (тефлон).

Датчики емкостного типа имеют множество преимуществ перед другими:

- форма датчика легко совмещается с разными конструкциями и поставленными задачами;
- не требуется больших усилий для передвижения чувствительного компонента;
- возможна длительная эксплуатация;
- отсутствуют подвижные контакты;
- повышенная чувствительность;
- малый расход электроэнергии;
- небольшие габаритные размеры и масса;
- технологичность при изготовлении, применение дешевых материалов и веществ.

Емкостные датчики отличаются своей простой конструкцией, что дает возможность создания надежных и прочных устройств. Свойства конденсатора зависят всего лишь от геометрических параметров и не имеют зависимости от свойств применяемых материалов, при условии их правильного подбора.

Недостатки:

- работа на высокой частоте;
- повышенные требования к экранированию элементов;
- малый коэффициент преобразования.

При использовании емкостных датчиков необходимо обеспечивать защиту от ложных срабатываний. Они возникают из-за случайного касания, воздействия атмосферных осадков, различных жидкостей.

Емкостные датчики применяются в системах управления технологическими процессами и системах регулировки во всех промышленных производствах. Они

имеют невысокую цену и широкий спектр направлений по использованию. Основными областями применения датчиков стали:

- подсчет штучного товара;
- регулировка натяжения конвейера;
- сигнализация обрыва проводника при намотке;
- контроль наполнения упаковки;
- сигнализация при заполнении стеклянных и пластиковых сосудов.

2.3. Электромагнитные датчики

Принцип действия электромагнитных датчиков основан на зависимости **параметров электромагнитной цепи** от измеряемого **перемещения** объекта.

В качестве измеряемой величины служат:

- перемещение элемента магнитной цепи (сердечника или якоря);
- перемещение элемента электрической цепи (обмотки).

В результате таких перемещений изменяется **индуктивность L** обмотки или ее **взаимоиндуктивность M** с обмоткой возбуждения. Поэтому в технической литературе электромагнитные датчики часто называют **индуктивными** [6].

Индуктивные датчики обычно рассматривают как параметрические, поскольку величины L и M зависят от перемещения X : $L = f(X)$, $M = f(X)$.

Электромагнитные датчики с изменяющейся взаимоиנדуктивностью относят к генераторному типу, поскольку в результате изменяется ЭДС обмотки, т.е. $E = f(X)$. Так как ЭДС в выходной обмотке появляется за счет изменения коэффициента взаимоиנדукции с обмоткой возбуждения, то такие электромагнитные датчики называют **трансформаторными**. Ведь обмотку возбуждения можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а выходную обмотку – как вторичную.

Для изготовления магнитопроводов применяются следующие ферромагнитные материалы: технически чистое железо, качественная углеродистая сталь, серый чугун, электротехническая кремнистая сталь, железоникелевые сплавы, железокобальтовые сплавы и др.

Для изготовления обмоток чаще всего используется медный провод. Это делается из-за того, что медь имеет малое электрическое сопротивление и высокую электропроводность. Благодаря своей гибкости и механической прочности, она хорошо обрабатывается и плохо поддается коррозии.

Однако медь – это достаточно ценный и дефицитный металл. Высокая стоимость меди связана с небольшими мировыми запасами ее руды. Из-за этого стоимость металла постоянно увеличивается. На сегодняшний день лучшей альтернативой меди является алюминий. Но алюминий имеет меньшую электропроводность. Также он менее гибок и уступает меди в пределах прочности.

2.3.1. Индуктивные датчики

В индуктивных датчиках **магнитная индукция** обмотки изменяется в зависимости от **механического перемещения** объекта.

Магнитная индукция — одна из двух фундаментальных характеристик магнитного поля (вместе с напряженностью магнитного поля). В системе СИ магнитная индукция измеряется в «тесла» (Тл). Происхождение термина “магнитная индукция” связано с тем, что изменение именно этой величины индуцирует вихревое электрическое поле [5, т.2, с. 655].

Принцип действия датчиков основан на изменении параметров магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности¹ внутри датчика. И как след-

¹ Поскольку величина ЭДС, создаваемой катушкой индуктивности, прямо пропорциональна скорости изменения тока, то и индуктивные датчики представляют собой электрические цепи переменного тока.

ствие – изменение амплитуды колебаний генератора. В результате вырабатывается аналоговый выходной сигнал, величина которого изменяется от расстояния между датчиком и объектом.

Наиболее часто индуктивные датчики изготавливаются в виде одинарных, дифференциальных и плунжерных.

Одинарные индуктивные датчики

Простейший индуктивный датчик представляет собой дроссель с переменным воздушным зазором в магнитопроводе. На рис. 13 показаны принципиальные схемы двух наиболее распространенных одинарных индуктивных датчиков на одном сердечнике.

На сердечнике 1 из электротехнической стали размещена обмотка 2, подключаемая к источнику переменного напряжения. Магнитный поток в сердечнике замыкается через якорь 3, который может перемещаться относительно сердечника 2.

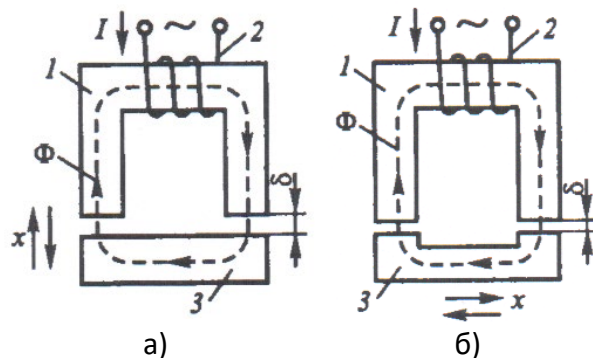


Рис. 13. Принципиальные схемы одинарных индуктивных датчиков: а) с вертикальным перемещением якоря; б) с горизонтальным перемещением якоря

Якорь 3 механически связан с деталью, перемещение которой необходимо измерить. Эта деталь на рис. 13 не показана, но ее перемещение может происходить в вертикальном направлении (см. рис. 13а) или в горизонтальном направлении (см. рис. 13б).

Перемещение якоря изменяет магнитное сопротивление магнитной цепи, состоящей из сердечника, якоря и воздушного зазора δ . Следовательно, изменится индуктивность обмотки 2. Поскольку эта обмотка включена на переменное напряжение, ток в обмотке 2 будет определяться ее полным сопротивлением, в которое входит и индуктивное сопротивление. С увеличением

воздушного зазора магнитное сопротивление увеличивается, а индуктивность, индуктивное и полное сопротивления уменьшаются. Следовательно, ток в обмотке увеличивается.

Одинарные индуктивные датчики имеют существенные недостатки:

- на якорь действует сила притяжения к сердечнику, которая вносит погрешность в работу датчика тем большую, чем меньше перестановочное усилие детали, перемещение которой надо измерить;
- при изменении знака входного сигнала не меняется знак выходного сигнала (т.е. датчик не является реверсивным);
- диапазон изменения входного сигнала, при котором сохраняется линейность статической характеристики, невелик.

Датчики применяют в качестве бесконтактных датчиков положения и концевых выключателей при управлении механизмами, имеющими сравнительно большие перестановочные усилия.

Дифференциальные (реверсивные) индуктивные датчики

Дифференциальные индуктивные датчики представляют собой совокупность двух одинарных (нереверсивных) датчиков с общим якорем.

На рис. 14 показана принципиальная схема датчика, состоящего из двух одинаковых сердечников 1 и 2 с обмотками, расположенного между сердечниками якоря 3, способного перемещаться влево и вправо относительно среднего симметричного положения.

Питание датчика осуществляется от трансформатора с выводом от средней точки вторичной обмотки. Сопротивление

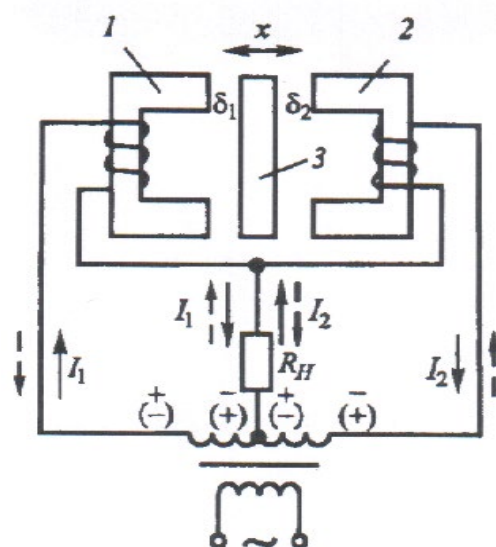


Рис. 14. Принципиальная схема дифференциального индуктивного датчика

нагрузки R_H включается между этой средней точкой и общей точкой обмоток сердечников 1 и 2. Ток в сопротивлении можно представить как алгебраическую сумму двух токов: в левом и правом контурах. Каждый контур состоит из половины вторичной обмотки трансформатора, одинарного индуктивного датчика и сопротивления нагрузки R_H , общего для обоих контуров.

Рассмотрим направления контурных токов в момент времени, когда во вторичной обмотке трансформатора индуцируется условно положительный полупериод напряжения: плюс – у левого зажима; минус – у правого. Полярность средней точки относительно левого зажима будет минусовая, а относительно правого – плюсовая. Принимая за положительное направление тока во внешней цепи от плюса к минусу, определяем, что ток левого контура I_1 направлен сверху вниз, а ток правого контура I_2 – снизу вверх. Следовательно, эти токи вычитаются, а через нагрузку пойдет разностный ток. В следующий полупериод полярность изменится на противоположную. Соответственно изменится направление токов в нагрузке, но опять ток в нагрузке будет равен разности токов I_1 и I_2 .

При среднем (симметричном) положении якоря 3 индуктивности обмоток 1 и 2 одинаковы. Следовательно, токи I_1 и I_2 равны, разность их равна нулю, выходной сигнал (ток в сопротивлении нагрузки) равен нулю: $I_H = I_1 - I_2 = 0$.

При перемещении якоря вправо (примем его за положительный входной сигнал) индуктивность L_2 возрастает, поскольку воздушный зазор в одинарном индуктивном датчике 2 уменьшается, а индуктивность L_1 убывает, поскольку зазор в датчике 1 увеличивается. Следовательно, $I_1 > I_2$ и появляется выходной сигнал в виде тока нагрузки определенной полярности. При перемещении якоря влево (отрицательный входной сигнал) соответственно уменьшается L_2 и увеличивается L_1 , соотношение токов $I_1 < I_2$ и полярность тока нагрузки изменяется. Поскольку речь идет о переменном синусоидальном токе, это означает, что фаза тока изменяется на 180° . Таким образом, статическая характеристика

дифференциального датчика будет реверсивной, зависящей от знака входного сигнала. А дифференциальным датчик называется потому, что выходной сигнал формируется как разность сигналов двух одинаковых датчиков.

Силы притяжения якоря к сердечникам возникают и в этом случае, но направлены они в противоположные стороны и поэтому почти полностью взаимно компенсируются. Поэтому для перемещения якоря требуется незначительное усилие. Очень важной особенностью дифференциального датчика является равенство нулю выходного сигнала при нулевом входном сигнале. Напомним, что в одинарном датчике выходной сигнал (ток через обмотку) был не равен нулю даже при нулевом воздушном зазоре.

Дифференциальные датчики по сравнению с одинарными имеют преимущества:

1. Большее рабочее перемещение якоря.

2. Погрешности от наличия усилий притяжения, колебаний питающего напряжения и температуры окружающей среды в значительной степени взаимно компенсируются во всем рабочем диапазоне.

3. Большая чувствительность.

Недостатки: большая инерционность, большие размеры.

Плунжерные датчики

Плунжерный датчик представляет собой катушку 2 с перемещающимся внутри нее ферромагнитным сердечником (плунжером) 3 (рис. 15).

Если сердечник полностью введен внутрь катушки, на которую намотана обмотка 1, то ее индуктивное сопротивление максимально, а ток в обмотке имеет минимальное значение. При выводе сердечника из катушки индуктивное сопротивление уменьшается, а ток соответственно увеличивается.

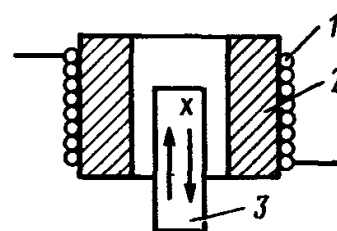


Рис. 15. Принципиальная схема плунжерного датчика

Эти датчики также называют индуктивными датчиками с *разомкнутым магнитопроводом*, поскольку даже при максимальной индуктивности обмотки основной путь магнитного потока проходит по воздуху. С этой точки зрения, рассмотренные выше датчики с обмоткой на неподвижном сердечнике и с перемещающимся якорем называют индуктивными датчиками с *замкнутым магнитопроводом*.

У плунжерных датчиков есть одна очень важная особенность: они позволяют получить информацию о перемещении из замкнутого, изолированного пространства. Например, надо измерить уровень химически агрессивной жидкости, пары которой ядовиты, да еще находятся под большим давлением. Тогда катушку 1 плунжерного датчика надевают на разделительную трубку 3 из нержавеющей немагнитной стали, внутри которой и перемещается сердечник 2 из ферромагнитного материала (рис. 16).

Перемещение сердечника изменяет индуктивность катушки, а разделительная трубка не экранирует магнитное поле, поскольку материал трубки имеет очень малую магнитную проницаемость. Таким образом, обмотка датчика, все другие электрические элементы измерительной схемы размещены в обычных нормальных условиях. Поэтому про плунжерные датчики говорят, что они позволяют вывести переме-

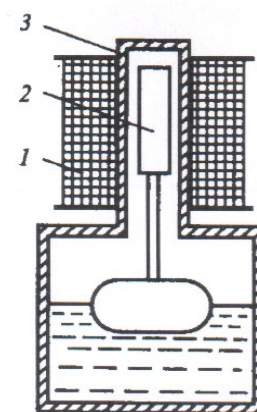


Рис. 16. Принципиальная схема изолированного плунжерного датчика

щение из замкнутого объема. В этом основное преимущество плунжерных датчиков перед датчиками с замкнутым магнитопроводом. Но по чувствительности и мощности выходного сигнала плунжерные датчики уступают.

2.3.2. Трансформаторные датчики

В трансформаторных датчиках ЭДС вторичной обмотки изменяется в зависимости от **механического перемещения** объекта.

Принцип действия трансформаторных датчиков основан на изменении коэффициента взаимной индукции обмоток при перемещении якоря. Они относятся к электромагнитным датчикам генераторного типа. Магнитные системы трансформаторных датчиков такие же, как и у рассмотренных индуктивных датчиков. Отличие заключается лишь в том, что добавляется еще обмотка, с которой и снимается выходной сигнал. Благодаря этому в трансформаторных датчиках отсутствует непосредственная электрическая связь между цепью питания и измерительной цепью. Существует связь лишь за счет магнитного поля (трансформаторная связь), что позволяет выбором числа витков выходной обмотки получить любой уровень выходного напряжения.

В зависимости от назначения, трансформаторные датчики изготавливаются для измерения линейных или угловых перемещений.

Датчики линейных перемещений

На рис. 17 показана принципиальная схема трансформаторного датчика для измерения линейных перемещений.

Обмотка возбуждения W_1 питается напряжением U_1 , которое создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Во вторичной обмотке W_2 индуцируется ЭДС E_2 , значение которой зависит от величины воздушного зазора δ . Максимальная ЭДС E_2 получается при $\delta = 0$, поскольку при этом магнитное сопротивление замкнутого магнитопровода

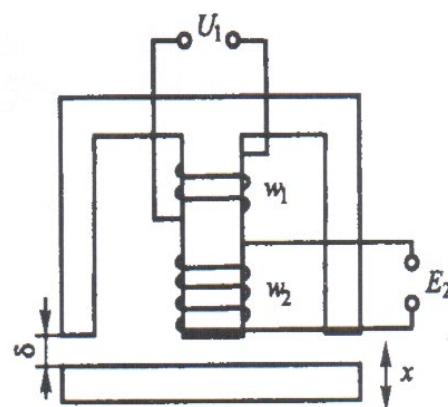


Рис. 17. Принципиальная схема трансформаторного датчика для измерения линейных перемещений

минимально и по нему проходит максимальный магнитный поток Φ . С увеличением δ уменьшаются магнитный поток и соответствующая ему ЭДС E_2 . Такой датчик используется для измерения малых линейных перемещений, но имеет

серьезный недостаток: зависимость ЭДС E_2 от перемещения якоря x нелинейна и не проходит через нуль.

Датчики угловых перемещений

На рис. 18 показана принципиальная схема трансформаторного датчика для измерения угловых перемещений.

Магнитопровод датчика неподвижен и состоит из ярма 1 и сердечника 2. Обмотка возбуждения W_1 размещена на ярме 1, запитана переменным напряжением U_1 и создает в зазоре между ярмом 1 и сердечником 2 переменный магнитный поток Φ , амплитудное значение которого неизменно. В зазоре с равномерным распределением индукции размещена поворотная рамка 3 с вторичной обмоткой W_2 , в которой индуцируется ЭДС E_2 , являющаяся выходным сигналом датчика.

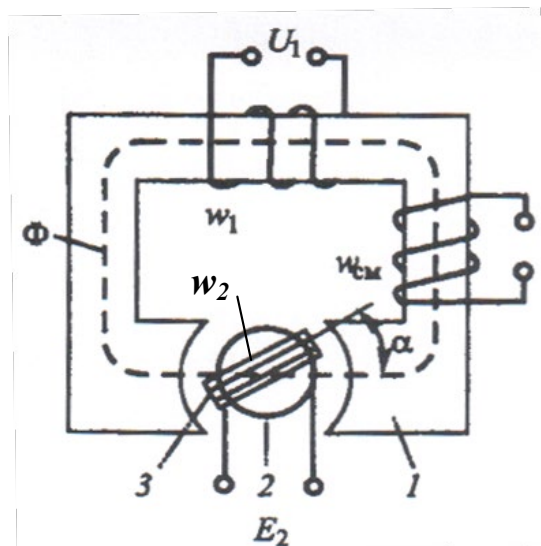


Рис. 18. Принципиальная схема трансформаторного датчика угловых перемещений

В зависимости от угла поворота α E_2 изменяется от нуля (при $\alpha = 0^\circ$ плоскость рамки размещена вдоль направления магнитного потока) до максимального значения (при $\alpha = 90^\circ$ плоскость рамки размещена поперек направления магнитного потока, весь магнитный поток сцеплен с витками вторичной обмотки W_2). При изменении знака угла поворота α фаза ЭДС E_2 изменяется на 180° , т.е. датчик является реверсивным. В некотором диапазоне входного сигнала (угла поворота α) обеспечивается линейная зависимость $E_2 = f(\alpha)$.

Если необходимо измерять большие угловые перемещения в одну сторону, то последовательно с вторичной обмоткой включается дополнительная обмотка смещения W_{CM} , размещенная на ярме 1. Потокосцепление ее неизменно. Следовательно, в ней индуцируется ЭДС E_{CM} с постоянным амплитудным

значением. При последовательном соединении обмоток W_2 и W_{CM} ЭДС E_2 и E_{CM} суммируются (с учетом фазы).

Такие датчики, под названием *ферродинамических преобразователей*, получили распространение для дистанционной передачи показаний различных приборов. Недостатком ферродинамических преобразователей является зависимость выходного сигнала от колебаний напряжения и частоты питания.

Достоинства трансформаторных датчиков:

- достаточно высокая выходная мощность, позволяющая обойтись без усилительных устройств;
- высокие чувствительность и разрешающая способность;
- простота конструкции;
- высокая надежность;
- малая масса и размеры при расчете на напряжение повышенной частоты;
- невысокая стоимость.

Недостатки:

- трудность регулировки и компенсации начального напряжения на выходе;
- необходимость экранирования, чтобы уменьшить уровень помех, что увеличивает размеры и массу;
- возможность работы только на переменном токе;
- ограниченность диапазона линейной статической характеристики.

2.3.3. Вращающиеся трансформаторы

Во вращающихся трансформаторах (ВТ) **выходное переменное напряжение** изменяется в зависимости от **механического перемещения** объекта.

ВТ в основном представляют собой двухполюсные электрические микромашины¹ [7].

¹ Для повышения точности в системах дистанционной передачи данных могут применять и многополюсные ВТ.

По конструкции и наличию скользящего контакта ВТ разделяют на контактные и бесконтактные.

На рис. 19 представлена принципиальная схема контактного ВТ.

ВТ состоит из статора 1 и ротора 3. Они выполнены из набранных и изолированных между собой пластин из электротехнической стали или пермаллоя¹, в которых сделаны пазы для укладки обмоток: двух взаимно перпендикулярных на роторе, и двух взаимно перпендикулярных на статоре.

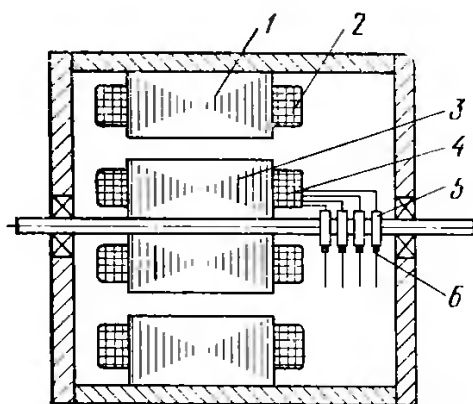


Рис. 19. Принципиальная схема контактного ВТ

Обмотки статора 2 выполняют с одинаковым числом витков, с одним сечением обмоточного провода и по одной схеме. Одинаковыми изготовляют и роторные обмотки 4.

Пространственное размещение обмоток показано на рис. 20.

Возможны два варианта расположения обмоток: возбуждения и квадратурная (первичные) на статоре, синусная и косинусная (вторичные) на роторе, и наоборот.

Концы статорных обмоток подводят непосредственно к соединительным колодкам. Концы роторных обмоток ВТ контактного типа выводят через токосъемное устройство – четыре контактных кольца 5 и щетки 6.

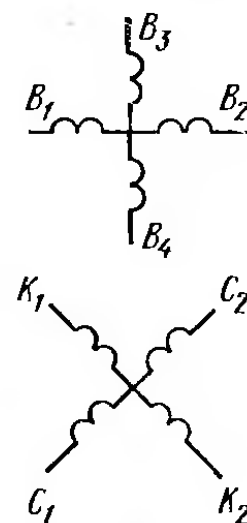


Рис. 20. Пространственное размещение обмоток ВТ:

В бесконтактных ВТ напряжение с обмоток ротора можно снимать (подавать) двумя способами: с помощью четырех спиральных пружин, один конец которых закреплен на статоре, другой – на роторе, и с

B_1B_2 – обмотка возбуждения;
 B_3B_4 – квадратурная обмотка;
 C_1C_2 и K_1K_2 – синусная и косинусная обмотки

¹ Сплав железа и никеля с малым магнитным сопротивлением.

помощью переходных кольцевых трансформаторов.

В первом случае угол поворота ротора ограничен в пределах 1,8...2 оборота, во втором – не ограничен. Устранение скользящих контактов повышает надёжность и точность ВТ.

Особенностью ВТ является то, что у них взаимоиндуктивность между первичными и вторичными обмотками при повороте ротора изменяется строго по синусоидальному (или косинусоидальному) закону в зависимости от угла поворота, что обеспечивает такой же закон изменения амплитуды ЭДС вторичных обмоток.

Возможно несколько режимов работы ВТ в зависимости от схемы включения их обмоток:

1) синусно-косинусные (СКВТ), у которых выходное напряжение одной обмотки пропорционально синусу угла поворота ротора, а другой обмотки – косинусу угла поворота ротора;

2) линейные (ЛВТ), у которых выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора;

3) масштабные (МВТ), у которых выходное напряжение пропорционально входному и коэффициент пропорциональности (масштаб) определяется углом поворота ротора;

4) датчики и приемники трансформаторных дистанционных передач угла (ДПВТ), выполняющие функции, аналогичные функциям трансформаторных сельсинов;

5) преобразователи координат, осуществляющие поворот осей декартовой системы координат или переход к полярной системе координат (построители);

6) первичные преобразователи угла для индукционных фазовращателей, осуществляющих преобразование пространственного угла во временной.

Для работы ВТ необходимы дополнительные усилительные устройства с большим коэффициентом усиления, так как их выходная мощность сигнала незначительная.

Вращающиеся трансформаторы применяются в аналого-цифровых преобразователях, системах передачи угла высокой точности, в качестве датчиков обратной связи в следящих системах, бортовой аппаратуре.

3. Датчики деформации¹

Деформация (механическая) – изменение взаимного расположения множества частиц материальной среды, которое приводит к искажению формы и размеров тела и вызывает изменение сил взаимодействия между частицами, т.е. появление напряжений [5, т.1, с. 598].

Датчик деформации — это устройство, предназначенное для определения искажения формы и размеров тела контролируемого объекта посредством преобразования этих изменений в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

По способу преобразования датчики деформаций наиболее часто подразделяют на следующие виды:

- тензорезистивные;
- пьезоэлектрические;
- магнитоупругие.

3.1. Тензорезистивные датчики

Тензорезистивные датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **электрического сопротивления** чувствительного элемента от его **механического напряжения**, вызываемого деформацией.

Конструкция тензорезистора представлена на рис. 21. Датчик состоит из подложки 2, на которой при помощи связующего (клея) укреплен чувствительный элемент 1, к нему присоединены выводные проводники 3.

¹ Строго говоря, датчики деформации представляют собой датчики механических перемещений. Отличие заключается в диапазоне применения – до нескольких десятков микрометров.

Чувствительные элементы обычно изготавливаются из тонкой металлической проволоки толщиной 0,02...0,05 мм, фольги толщиной 0,004...0,012 мм, или напыляются в вакууме для получения плёнки полупроводника или металла. Плёночные металлические тензорезисторы имеют площадь около 2...10 мм². В качестве подложки обычно используют ткань, бумагу, полимерную плёнку, слюду и др.

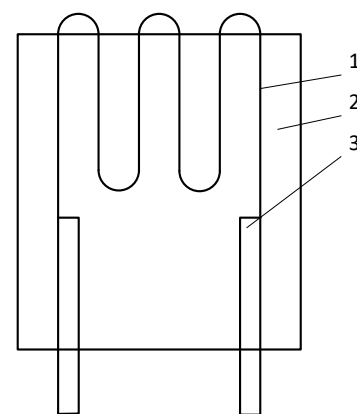


Рис. 21. Конструкция тензорезистора

На рис. 22 схематически изображена схема крепления полупроводникового тензодатчика, наклеенного на деталь.

К достоинствам тензорезисторов относят:

- низкий температурный коэффициент сопротивления в рабочем диапазоне температур;

- линейную зависимость сопротивления от деформации в широком диапазоне деформаций;

- химическую стойкость к материалу, обеспечивающему крепёж датчика;
- стойкость к окислению и механическую прочность.

К недостаткам этих датчиков относят:

- малую механическую прочность (хрупкость);
- сильное влияние окружающей температуры;
- большой разброс параметров датчиков внутри партии (до 20 %).

Источником погрешности является температурная зависимость сопротивления и коэффициента деформации линейного теплового расширения исследуемой детали, вызывающая «ползучесть» характеристики вследствие остаточных деформаций решетки и вследствие старения, а также снижение чувствительности с ростом частоты изменения измеряемой деформации.

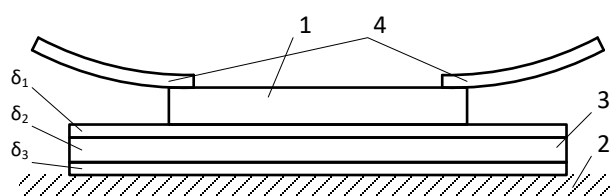


Рис. 22. Схема крепления полупроводникового тензодатчика на детали 1 – датчик; 2 – деталь; 3 – подложка; 4 – выводные провода; δ_1 , δ_2 , δ_3 – толщины изоляционных слоев

Тензорезистивные датчики применяют для измерения веса, давления, силы, перемещения, момента, ускорения, вибрации, натяжения, крутящего момента, остаточных напряжений в механических конструкциях и деталях машин после их обработки и т.д.

3.2. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **поляризации** чувствительного элемента от его **механического напряжения**, вызываемого деформацией.

Структурная схема пьезоэлектрического датчика представлена на рис. 23.

Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах от среза прикрепляют электроды. Построенный таким образом датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выравнивают заряды

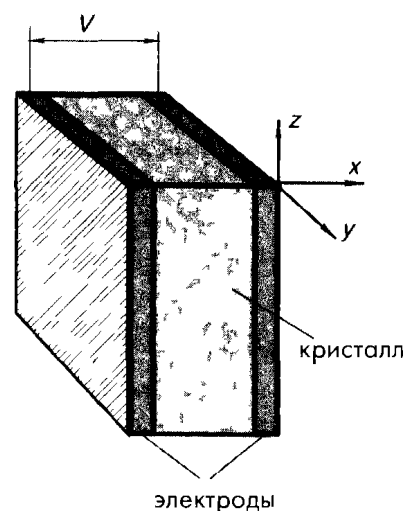


Рис. 23. Структурная схема пьезоэлектрического датчика

вдоль всей их поверхности, лишая конденсатор избирательности. Однако, если форму электродов усложнить, можно определить точное место приложения внешней силы, детектируя сигналы с конкретных электродов.

Наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент работает на сжатие-растяжение, применяются конструкции, в которых элемент работает на изгиб и сдвиг.

Преобразователь, работающий на изгиб, представляет собой две одинаковые пластины, склеенные между собой. Между ними располагается металлическая фольга. При изгибе такого элемента одна пластина удлиняется, а другая укорачивается. В зависимости от схемы подключения обкладок можно получить либо сумму напряжений (рис. 24а), либо сумму зарядов (рис. 24б).

Преобразователь, работающий на сдвиг, представляет собой кольцо из керамики 1 (рис. 25), в которое вклеен внутренний электрод 3 и которое само вклеено во внешний электрод 2.

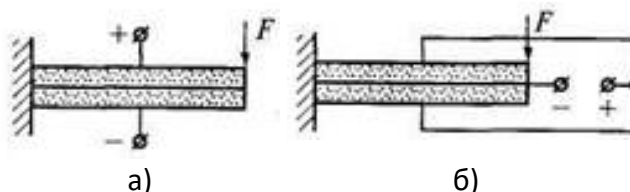


Рис. 24. Пьезодатчики, работающие на изгиб

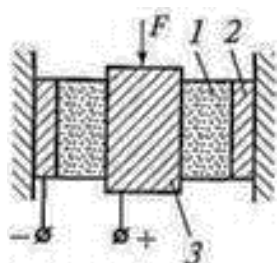


Рис. 25. Пьезодатчик, работающий на сдвиг

Под действием силы F происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации. Достоинством такого преобразователя является отсутствие зарядов на электродах при боковых воздействиях на датчик.

В пьезоэлектрических датчиках широко применяется кварц (SiO_2). Однако в последние десятилетия в качестве чувствительных элементов датчиков используются такие разновидности пьезоэлектриков, как пироэлектрики, сегнетоэлектрики и сегнетоэлектрические пьезокерамики.

Достоинства пьезоэлектрических датчиков: малые габариты, возможность измерения быстропеременных нагрузок, надежность и простота конструкции.

Недостатки различны у различных материалов: у кварца – малая пьезоэлектрическая постоянная, у других – температурная зависимость.

Области применения пьезоэлектрических датчиков: измерение вибраций, давлений, усилий, сосредоточенных сил, ускорений.

3.3. Магнитоупругие датчики

Магнитоупругие датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **магнитной проницаемости** чувствительного элемента от его **механического напряжения**, вызываемого деформацией.

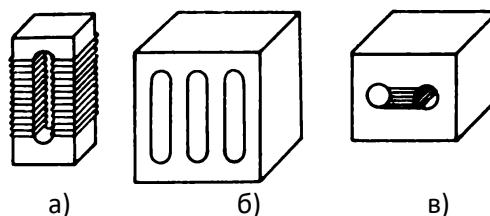
Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на *эффекте Виллари* – изменение намагниченности чувствительного элемента под действием механических деформаций. Назван по имени открывшего его в 1865 г. итальянского физика Э.Виллари [8].

Конструктивно магнитоупругие датчики представляют магнитопровод с одной или несколькими обмотками. Наиболее широкое применение нашли датчики дроссельного и трансформаторного типов.

3.3.1. Датчики дроссельного типа

В большинстве случаев датчик представляет собой одну или несколько обмоток, уложенных в специальных окнах и соединенных последовательно на чувствительном элементе (рис. 26) [9].

Простейший дроссельный датчик (рис. 27) представляет собой катушку, пи-



а) б) в)
Рис. 26. Конструкционные схемы датчиков дроссельного типа:

а – двухстержневой;
б – четырехстержневой;
в - трехстержневой с круглыми окнами

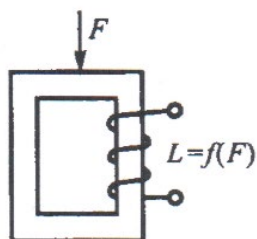


Рис. 27. Принципиальная схема дроссельного датчика

таемую переменным током и создающую магнитный поток в чувствительном элементе. При внешнем механическом воздействии F в чувствительном элементе возникают механические напряжения, и происходит изменение магнитной проницаемости, что приводит к изменению индуктивности катушки L и индуктивного

сопротивления. При включении такого датчика последовательно в цепь между источником переменной ЭДС и нагрузкой будет наблюдаться изменение тока в цепи и как следствие – изменение напряжения на нагрузке.

3.3.2. Трансформаторные датчики

Простейший трансформаторный датчик (рис. 28) состоит из двух обмоток, намотанных на сердечник с необходимыми магнитоупругими свойствами, и представляет собой трансформатор, при этом одна из обмоток (первичная) подключается к источнику переменной ЭДС, а другая (вторичная) — к нагрузке.

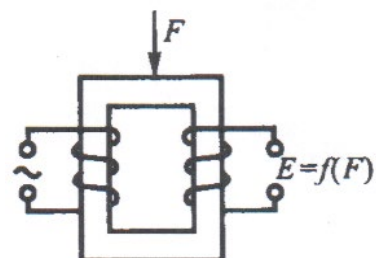


Рис. 28. Принципиальная схема трансформаторного датчика

Возникновение механических напряжений F в сердечнике приводит к изменению магнитной проницаемости и, значит, к изменению взаимной индуктивности M между обмотками и разному напряжению, индуцируемому во вторичной обмотке.

3.3.3. Шунтовые датчики

Разновидность трансформаторного датчика — **шунтовый** датчик (рис. 29), в котором на одном стержне сердечника находится первичная обмотка 1, на другом — вторичная 2, средний стержень сердечника не имеет обмотки (шунтовой стержень). И поскольку путь для маг-

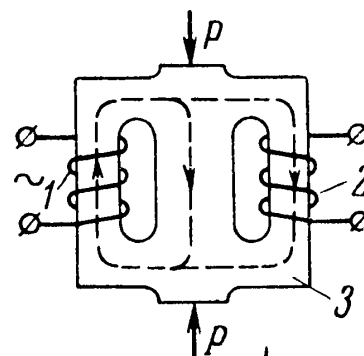


Рис. 29. Принципиальная схема шунтового датчика

нитного потока 3 через шунтирующий стержень короче, а сечение шунтирующего стержня больше, то магнитный поток от первичной обмотки практически не попадает в стержень со вторичной обмоткой, но при приложении усилия

на шунтовой стержень (с положительной магнитострикцией¹) его магнитная проницаемость уменьшается и поток начинает замыкаться через стержень со вторичной обмоткой, в которой появляется напряжение.

3.3.4. Дифференциально-трансформаторные датчики

В этом датчике (рис. 30) первичная обмотка находится на среднем стержне, а на двух боковых стержнях – две вторичные с одинаковыми параметрами. Один из боковых магнитопроводов условно назван чувствительным, а другой – компенсационным элементом. Вторичные обмотки включаются встречно, поэтому на нагрузке (без приложения механического напряжения к датчику) суммарное напряжение равно нулю. При возникновении механического напряжения на одном из стержней баланс нарушается, и на нагрузке появляется электрическое напряжение E .

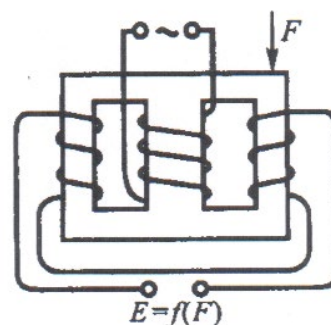


Рис. 30. Принципиальная схема дифференциально-трансформаторного датчика

3.3.5. Прессдукторы

Разновидностью трансформаторных датчиков является прессдуктор, который представляет собой пакет пластин, на диагоналях которых симметрично расположены четыре отверстия (рис. 31). Через отверстия намотаны две независимые обмотки: первичная – по одной диагонали пакета, вторичная – по другой. Плоскости обмоток расположены под углом 45° к направлению усилия. Пластины собирают таким образом, чтобы магнит-

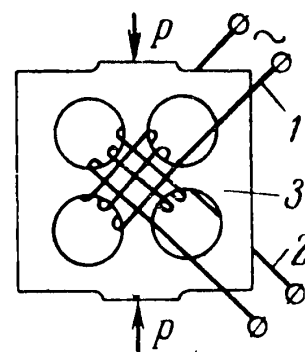


Рис. 31. Принципиальная схема прессдуктора

¹ Магнитострикция – физический эффект изменения объема и линейных размеров тела при изменении его намагниченности.

ная проницаемость пакета в направлениях, параллельном и перпендикулярном сжатию, была одинакова. При такой конструкции в ненагруженном сердечнике поток первичной обмотки не охватывает витки вторичной, и в последней не наводится ЭДС. При приложении усилия к сердечнику магнитный поток охватывает витки вторичной обмотки, и на нагрузке появляется сигнал.

К достоинствам магнитоупругих датчиков следует отнести высокую чувствительность и возможность измерения больших усилий (до нескольких тысяч тонн). В то же время магнитоупругие датчики имеют и следующие серьезные недостатки:

- наличие температурной погрешности, вызванной влиянием температуры окружающей среды на магнитные свойства сердечника;
- наличие погрешности, вызванной влиянием гистерезиса (как магнитного, так и механического, связанного с остаточной деформацией);
- наличие погрешности, вызванной колебаниями напряжения питания.

Следует отметить, что в магнитоупругих датчиках имеет место и еще одно физическое явление – магнестрикционный эффект. Его действие обратное магнитоупругому эффекту: ферромагнитное тело, помещенное в магнитное поле, изменяет свои геометрические размеры, т.е. в нем появляются механические деформации.

В переменном магнитном поле и деформации будут переменными. А так как знак деформации не зависит от направления магнитного поля, то частота колебаний деформации будет в два раза выше частоты переменного тока. На этом принципе работают, например, магнестрикционные излучатели ультразвуковых колебаний.

Магнитоупругие датчики используются для измерения силовых параметров: усилий, давлений, крутящих и изгибающих моментов, механических напряжений и т.д.

4. Оптические датчики

Оптика – раздел физики, в котором изучаются оптическое излучение (свет), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества. Оптический диапазон длин волн ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения [5, т.3, с. 418].

Оптический датчик – это устройство, предназначенное для определения оптического излучения контролируемого объекта посредством преобразования изменений электромагнитных волн в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

В основе действия оптических датчиков¹ лежит *фотоэффект* – испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения (фотонов) [5, т.5, с. 369].

Электроны, испускаемые из вещества, называются *фотоэлектронами*, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется *фототоком*.

Характеристики оптического излучения во взаимодействии с веществом рассматриваются *фотометрией* – разделом физической оптики и метрологии [5, т.5, с. 353].

В оптических датчиках используются 2 основных вида фотоэффекта – внешний и внутренний.

Внешним фотоэффектом называется *фотоэлектронная эмиссия* – испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения [5, т.5, с. 364]. Датчик с внешним фотоэффектом называется **фотоэлементом** [5, т.5, с. 368].

¹ Оптические датчики называют ещё оптическими бесконтактными выключателями, фотодатчиками, фотоэлектрическими датчиками.

Внутренним фотоэффектом называется возникновение свободных носителей заряда – электронов и (или) дырок в твердом теле при поглощении в нем квантов электромагнитного излучения [5, т.5, с. 370].

Эффект объясняется перераспределением электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящим под действием излучений. Проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению *фотопроводимости* и (или) *фотогальванического эффекта* [10].

Фотопроводимостью называется изменение электрической проводимости среды под действием электромагнитного излучения [5, т.5, с. 355]. Датчики с изменяемой проводимостью под действием электромагнитного излучения называют *фоторезистивными* или *фоторезисторами (фотосопротивлениями)*.

Фотогальванический эффект – возникновение электрического тока при действии электромагнитного излучения на образец – полупроводник или диэлектрик, включенный в замкнутую цепь (фототок) или возникновение ЭДС в образце при разомкнутой цепи [5, т.5, с. 343]. Наибольшее распространение среди датчиков, основанных на фотогальваническом эффекте, получили *вентильные¹ фотоэлементы* (датчики с “запирающим слоем”) – *фотодиоды*.

4.1. Фотоэлементы

Фотоэлементы относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **фотоэлектронной эмиссии** чувствительного элемента от **электромагнитного излучения** объекта.

¹ Вентильный фотоэффект – односторонняя проводимость.

Фотоэлемент представляет собой вакуумированную или газонаполненную стеклянную колбу со встроенными анодом A и фотокатодом K (рис. 32).

Катод в виде тонкого светочувствительного слоя нанесен на внутреннюю поверхность баллона. Анод изготовлен в виде кольца, расположенного в центре баллона. Выводы от катода и анода сделаны через ножку на нижний цоколь.

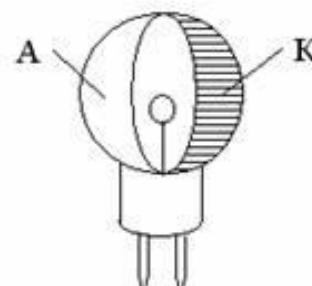


Рис. 32. Устройство вакуумного фотоэлемента

На рис. 33 показана простейшая схема включения фотоэлемента.

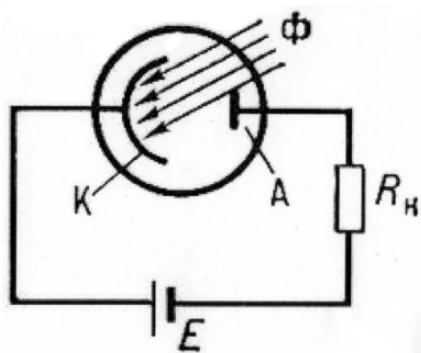


Рис. 33. Схема включения фотоэлемента

Под действием светового потока Φ из фотокатода K вылетают электроны. Они попадают в ускоряющее электрическое поле анода A и, достигая анода, создают в цепи фототок, пропорциональный интенсивности светового потока. При изменении светового потока изменяется фототок, а следовательно, и падение напряжения на

резисторе нагрузки R_n . Таким образом, с помощью фотоэлемента световой поток осуществляет управление выходным напряжением источника E .

Материалы фотокатода (двойные щелочи на основе калия и цезия, натрия и калия) определяют чувствительность прибора и длины волн, на которые он реагирует (от 200 до 700 нм).

Ток в фотоэлементе незначительный. Увеличение тока в фотоэлементах достигается двумя способами:

- 1) использованием вторичной электронной эмиссии. Такие приборы называются **фотоэлектронными умножителями**;
- 2) наполнением баллона фотоэлемента инертным газом. Такие приборы называются **газонаполненными (ионными) фотоэлементами**.

Фотоэлементы преобразуют энергию излучения в электрическую лишь

частично. Так как эффективность преобразования небольшая, то в качестве источников электроэнергии их не используют, но зато применяют их в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков.

Линейность зависимости анодного тока от светового потока и слабая зависимость от температуры – главные достоинства фотоэлементов с внешним фотоэффектом, в связи с чем они очень подходят для фотометрии [11].

4.2. Фоторезисторы

Фоторезисторы (болометры) относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **электрического сопротивления** чувствительного элемента от **электромагнитного излучения** объекта.

Принцип их действия основан или на генерации *p-n* пар (при собственной фотопроводимости), или на отрыве носителя заряда от заряженного примесного центра (при примесной фотопроводимости).

Основу фоторезистора (рис. 34) составляет слой (или пленка) полупроводникового материала 2 на подложке 1 (или без нее) с нанесенными на него электродами 3, посредством которых фоторезистор подключается к электрической цепи.

Фоторезистор крепится в корпусе 4, снабжённом окошком 5, через которое проникает электромагнитное излучение Φ и выводятся электроды 3.

Высокая чувствительность, стабильность фотоэлектрических характеристик во времени, малая инерционность, простота устройства, допускающая

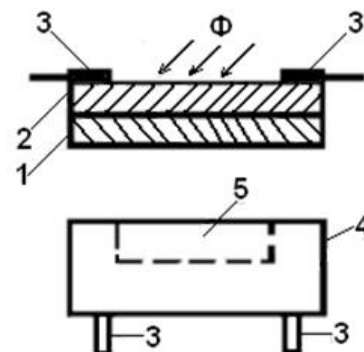


Рис. 34. Устройство фоторезистора

разнообразное конструктивно-технологическое исполнение, способность работать в широком диапазоне механических и климатических воздействий обусловили широкое использование фоторезистивных датчиков в устройствах оптоэлектроники.

Недостатки фоторезисторов:

- при большей освещённости линейность характеристики ухудшается;
- высокие сопротивления (как теневое, так и световое);
- низкая чувствительность (по сравнению с другими типами фотоэлементов);
- сопротивление существенно зависит от температуры;
- низкая скорость реакции на импульс (не более 1 кГц).

В настоящее время для изготовления фоторезисторов применяются сернистый свинец, сернистый висмут и сернистый кадмий.

Фоторезисторы нашли широкое применение в системах автоматики для контроля с любым видом передаваемой информации: сигнализации, измерения и регистрации.

4.3. Фотодиоды

Фотодиоды относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **фототока** чувствительного элемента от **электромагнитного излучения** объекта.

В основе принципа действия фотодиодов лежит использование односторонней проводимости *p-n*-перехода, при освещении которого появляется ЭДС (фотогальванический режим) или при наличии питания изменяется обратный ток (фотодиодный режим). Их изготавливают на основе гомоперехода (*p-n*-переход, образованный на границе двух областей одинакового материала, но с

примесями противоположного типа), гетероперехода (p - n -переход, образованный на границе двух областей разного материала с примесями противоположного типа), барьера Шоттки (контактный барьер, образующийся на границе металл и n -полупроводник или металл и p -полупроводник и различных МДП-структур¹).

Фотодиод представляет собой обычный диод в корпусе, в котором имеется окошко, позволяющее свету попадать в полупроводниковое соединение. Схема включения фотодиода в электрическую цепь представлена на рис. 35.

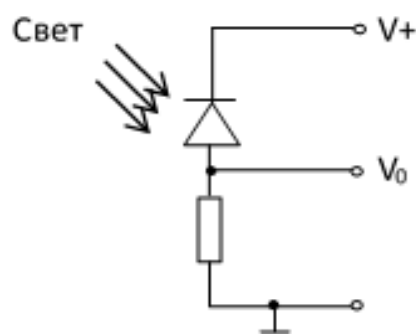


Рис. 35. Схема включения фотодиода в электрическую цепь

Ток, протекающий через фотодиод, прямо пропорционален интенсивности света.

Выходной сигнал снимается в виде разности потенциалов на резисторе, включенном последовательно с диодом.

Оптические измерительные приборы чрезвычайно разнообразны [12].

Фотометры – приборы для измерения световых потоков и величин, непосредственно связанных со световыми потоками: освещенности, яркости, светимости и силы света.

Спектральные измерительные приборы – огромный класс оптической техники, для которого общим является разложение электромагнитного излучения в спектр по длинам волн (спектроскопы, монохроматоры, полихроматоры, спектрографы, спектрофотометры и квантометры).

Интерферометры – приборы, в которых основной измеряемой характеристикой является фаза электромагнитного колебания.

Поляриметры – приборы для измерения параметров поляризации, т.е.

¹ Металл – диэлектрик – проводник.

определенная ориентация колебаний электромагнитной волны относительно направления распространения.

Рефрактометры – приборы для измерения показателя преломления твердых тел, жидкостей и газов.

Гониометры – приборы для угловых измерений. Представляют собой зрительные трубы или лазеры, оптическая ось которых снабжена отсчетным угловым лимбом.

Измерительные микроскопы – приборы для увеличения видимых размеров (или углов наблюдения) различных объектов и измерения размеров увеличенных деталей.

*Пирометры*¹ – приборы для измерения собственного теплового излучения тел (от слова «пиро» - огонь).

¹ Подробно о пирометрах в разделе 7 «Датчики температуры».

5. Датчики магнитного поля

Магнитное поле – силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом [5, т.2, с. 665].

Датчик магнитного поля — это устройство, предназначенное для определения параметров контролируемого объекта посредством преобразования воздействия магнитного поля контролируемого объекта в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

По способу преобразования датчики магнитного поля наиболее часто подразделяют на следующие виды:

- Виганда;
- Холла;
- магниторезистивные;
- индукционные;
- сверхпроводниковые.

5.1. Датчики Виганда

Датчики Виганда относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **магнитной поляризации** чувствительного элемента от **воздействия магнитного поля** объекта.

Эффект Виганда заключается в том, что если ферромагнитную проволоку внести в магнитное поле, то произойдет самопроизвольное изменение ее магнитной поляризации, как только напряженность поля превысит некоторое пороговое значение.

Это явление наблюдается при выполнении двух условий. Первое – про-

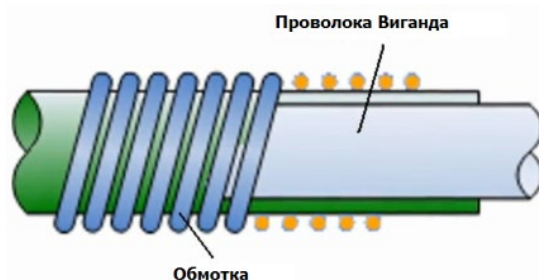
волокна должна иметь специальный химический состав и двухслойную структуру. Второе – напряженность магнитного поля должна быть выше определенного порогового значения – *порога зажигания*.

Момент изменения поляризации проволоки можно наблюдать с помощью катушки индуктивности, намотанной вокруг проволоки или размещенной рядом с ней. Индукционный импульс напряжения на ее выводах при этом достигает нескольких вольт. При изменении направления магнитного поля полярность индуктируемых импульсов изменяется.

В настоящее время эффект объясняют различной скоростью переориентации элементарных магнитов в магнитомягкой сердцевине и магнитотвердой оболочке проволоки.

Конструкция датчиков Виганда содержит катушку индуктивности и проволоку Виганда (рис. 36).

При смене поляризации проволоки, катушка, намотанная на неё, фиксирует это изменение.



Проволока Виганда изготавливается из сплава «Викалой» (10 % V, 52 % Co, 38 % Fe). Точный состав материала проволоки, как правило, является секретом фирмы.

К достоинствам датчика Виганда относят независимость от влияния внешних электрических и магнитных полей, широкий температурный диапазон работы ($-80^{\circ}\text{C} \dots +260^{\circ}\text{C}$), работу без источника питания.

Датчики Виганда применяются в расходомерах, датчиках скорости, угла поворота и положения. Кроме того, одно из наиболее частых применений этого элемента – системы считывания идентификационных карт. При прикладывании намагниченной карты меняется напряженность поля, на что реагирует датчик Виганда.

5.2. Датчики Холла

Датчики Холла относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **разности потенциалов** чувствительного элемента от **воздействия магнитного поля** объекта.

Эффект Холла состоит во взаимодействии перемещающихся электрических зарядов с магнитным полем. Суть эффекта поясняется на рис. 37.

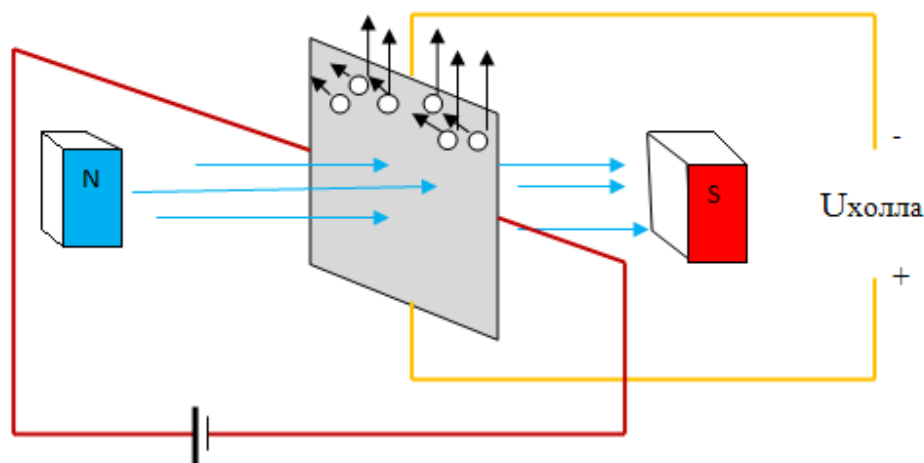


Рис. 37. Принцип работы датчика Холла

Через полупроводниковую пластину протекает ток от внешнего источника. Пластина находится в магнитном поле, пронизывающем ее в направлении, перпендикулярном движению тока. В магнитном поле под действием силы Лоренца электроны отклоняются от прямолинейного движения. Эта сила сдвигает их в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока.

В данном случае у верхнего края пластины электронов будет больше, чем у нижнего, т.е. возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов обуславливает появление выходного напряжения – напряжения Холла. Напряжение Холла пропорционально току и индукции магнитного поля. При постоянном значении тока через пластину оно определяется только значением индукции магнитного поля.

Чувствительные элементы для датчиков изготавливаются из тонких полупроводниковых пластинок или пленок. Эти элементы наклеиваются или напыляются на подложки и снабжаются выводами для внешних подключений.

Датчики Холла используются в системах, связанных с задачами навигации, измерения угла поворота и направления движения, определения координат объекта, распознавания «свой - чужой». Они широко применяются в системах автоматики, в бытовой технике и системах оптимизации работы различных агрегатов.

5.3. Магниторезистивные датчики

Магниторезистивные датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **электрического сопротивления** чувствительного элемента от **воздействия магнитного поля** объекта.

Принцип действия датчика заключается в изменении сопротивления материала в зоне действия магнитного поля. Наиболее сильно этот эффект проявляется в полупроводниковых материалах. Изменение их сопротивления может быть на несколько порядков больше, чем у металлов.

Суть эффекта поясняется на рис. 38.

При нахождении полупроводникового элемента с протекающим током в магнитном поле на электроны действуют

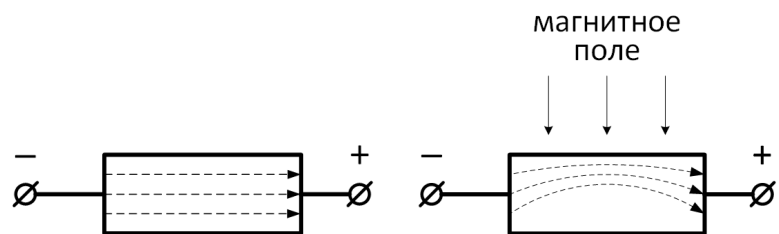


Рис. 38. Принцип работы магниторезистивного датчика

силы Лоренца. Эти силы вызывают отклонение движения носителей заряда от прямолинейного, искривляют его и, следовательно, удлиняют его. А удлине-

ние пути между выводами полупроводникового элемента равносильно изменению его сопротивления.

В магнитном поле изменение длины «пути следования» электронов обусловлено взаимным положением векторов намагниченности этого поля и поля протекающего тока. При изменении угла между векторами поля и тока пропорционально изменяется и сопротивление.

Таким образом, зная величину сопротивления датчика, можно судить о количественной характеристике магнитного поля.

Конструктивно датчик состоит из подложки (круглой или прямоугольной пластины толщиной 0,1...0,5 мм из радиокерамики, феррита, пермаллоя, пермендюра и др.), магниточувствительного резистивного элемента (в виде пластинки толщиной 10...80 мкм) и токоподводов для подключения к электрической цепи. Для защиты от механических повреждений и воздействия влаги резистивный элемент и часть токоподводов покрывают защитной эпоксидной плёнкой.

Для исключения влияния эффекта Холла размеры полупроводниковой полоски выдерживаются в определенных допусках – ширина ее должна быть много больше длины. Но такие датчики обладают малым сопротивлением, поэтому на одной подложке размещают необходимое число полосок и соединяют их последовательно.

С этой же целью часто датчик выполняется в виде диска Корбино¹ и других сложных конфигураций [13] (рис. 39). При отсутствии магнитного поля путь тока прямолинейен и направлен от центра диска к периферии по радиусу. При наличии магнитного поля ЭДС Холла не возникает, так как у диска отсутствуют противоположные грани. Сопротивление же датчика изменяется – под действием сил Лоренца пути тока искривляются.

¹ Металлический или полупроводниковый диск с отверстием в центре и с контактами, один из которых расположен на внутренней стенке отверстия, другой – на периферии диска.

Преимуществами магниторезисторов являются малые габариты и низкая стоимость. По сравнению с обычными переменными резисторами магниторезисторы имеют практически неограниченный срок службы (отсутствие подвижного контакта исключает механический износ), отличаются плавностью изменения сопротивления, а также отсутствием шумов, свойственных резисторам с подвижным контактом.

К недостаткам магниторезисторов относятся низкая чувствительность, нелинейность характеристики преобразования, высокая зависимость от температуры, изменение чувствительности магниторезистивного элемента при изменении угла между вектором магнитной индукции и плоскостью элемента, достаточно большая рассеиваемая мощность.

Применяются в основном в качестве датчиков магнитного поля, а в сочетании с управляющей магнитной системой – в качестве переменных резисторов в радиоаппаратуре и измерительных приборах и как переключательные элементы в бесконтактной коммутационной аппаратуре.

5.4. Индукционные датчики

Индукционные датчики относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости ЭДС чувствительного элемента от воздействия магнитного поля объекта.

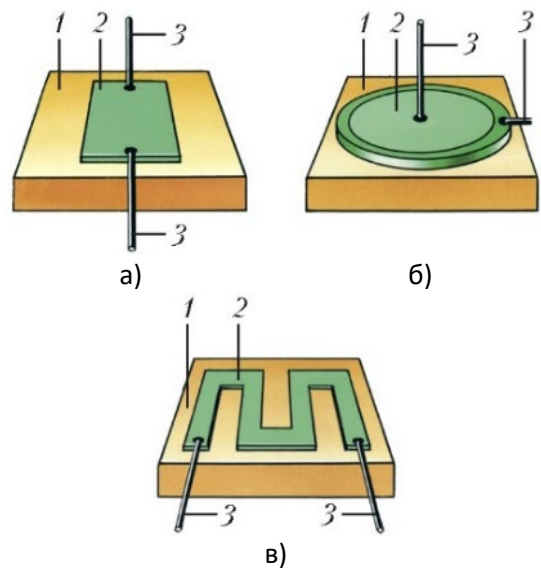


Рис. 39. Формы магниторезисторов:
а – прямоугольник; б - диск Корбино;
в – меандр;
1 – подложка; 2 – резистивный элемент;
3 – токоподводы

Принцип действия индукционных датчиков основан на эффекте **электромагнитной индукции** – возникновение ЭДС в проводнике при изменении магнитного потока, пронизывающего его. Явление электромагнитной индукции было открыто М. Фарадеем в 1831 г.

Поскольку в стационарном поле магнитный поток не изменяется, для создания в замкнутой цепи индукционного тока необходимо перемещать либо в магнитном поле сам проводник, либо магнитное поле. В качестве проводника применяется катушка индуктивности, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении.

Поэтому для измерения параметров стационарного магнитного поля применяются датчики:

- с катушкой индуктивности, вращающейся с постоянной скоростью в постоянном магнитном поле;
- с вращающимся ферромагнитным индуктором относительно неподвижной катушки.

5.4.1. Датчики с подвижной катушкой

Конструкция датчика показана на рис. 40. Он состоит из катушки индуктивности, расположенной на валу электродвигателя. Съем напряжения с вращающейся катушки осуществляется с помощью щеток. Выходное напряжение на выводах катушки представляет переменное напряжение, величина которого тем больше, чем больше частота вращения катушки и чем больше магнитная индукция поля.

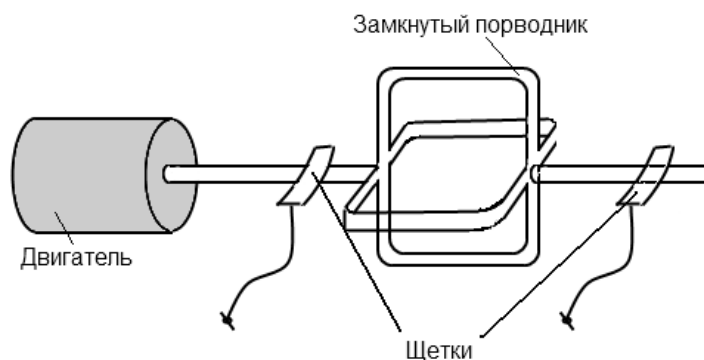


Рис. 40. Конструкция датчика с подвижной катушкой

Датчики используются для определения параметров переменных и стационарных магнитных полей.

5.4.2. Датчики с неподвижной катушкой

В простейшем случае датчик состоит из катушки с обмоткой, сердечника из магнитомягкого железа и магнита. Эти три компонента составляют статор датчика. Со статором взаимодействует ротор в виде зубчатого диска или зубчатой рейки с количеством зубцов, определяемым условиями применения датчика (рис. 41).

При вращении ротора, в обмотке статора возникает переменное напряжение. Когда один из зубцов ротора приближается к обмотке, напряжение в ней быстро возрастает и, при совпадении со средней линией обмотки, достигает максимума, затем, при удалении зуба, быстро меняет знак и увеличивается в противоположном направлении до максимума.

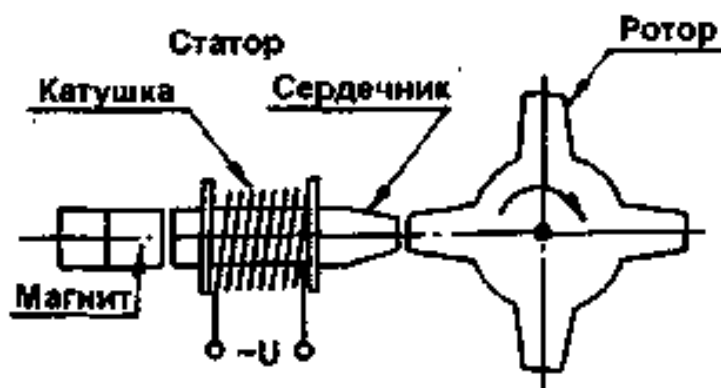


Рис. 41. Конструкция датчика с неподвижной катушкой

Величина напряжения, вырабатываемого датчиком, зависит от частоты вращения ротора, числа витков катушки и величины магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом. Поскольку две последние величины постоянны, величина индуцируемого напряжения достигает максимума при максимальной скорости вращения.

Индукционные датчики применяются для измерений вибрации, качания или удара. Очень широко применяются как элементы автомобильной автоматики. На их основе были созданы различные приборы – от самых простых, ре-

гистрирующих линейные перемещения, до сложных, таких как системы зажигания с цифровым управлением, системы впрыска топлива, антиблокировочные системы управления тормозами и т.п.

5.5. Сверхпроводниковые датчики

Сверхпроводниковые датчики относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **напряжения** чувствительного элемента от **воздействия магнитного поля** объекта.

Принцип действия датчиков основан на *эффекте Джозефсона (ДЭ)* – протекание сверхпроводящего тока через тонкую диэлектрическую прослойку между двумя сверхпроводниками (т.наз. джозефсоновский контакт) [5, т.1, с.602]. Эффект был предсказан на основе теории сверхпроводимости¹ английским физиком Б. Джозефсоном в 1962 г., а обнаружен американскими физиками П. Андерсоном и Дж. Роуэллом в 1963 г..

Суть эффекта в том, что электроны проходят через диэлектрик (обычно плёнку окиси металла толщиной $\sim 10^{-10}$ м) благодаря туннельному эффекту². Если ток через джозефсоновский контакт не превышает определённого значения, называемого критическим током контакта, то падение напряжения на

¹ Сверхпроводимость – свойство проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры T_K , характерной для данного материала. С. обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников. Рекордно высоким значением T_K (около 23 К) обладает соединение Nb_3Ge .

² Туннельный эффект (туннелирование) – квантовый переход микрочастицей потенциального барьера (пространственно ограниченной области высокой потенциальной энергии) в случае, когда её полная энергия (остающаяся неизменной) меньше высоты барьера. Т.э. – явление квантовой природы, невозможное в классической механике; аналогом Т.э. в волновой оптике служит проникновение световой волны внутрь отражающей среды (на расстояния порядка длины световой волны) в условиях, когда, с точки зрения геометрической оптики, происходит полное внутреннее отражение.

контакте отсутствует (т. наз. стационарный ДЭ). Если же через контакт пропустить ток, больший критического, то на контакте возникает падение напряжения, и контакт излучает электромагнитные волны (нестационарный ДЭ) [14].

На рис. 42 показаны схемы экспериментов, объясняющих эффект Джозефсона.

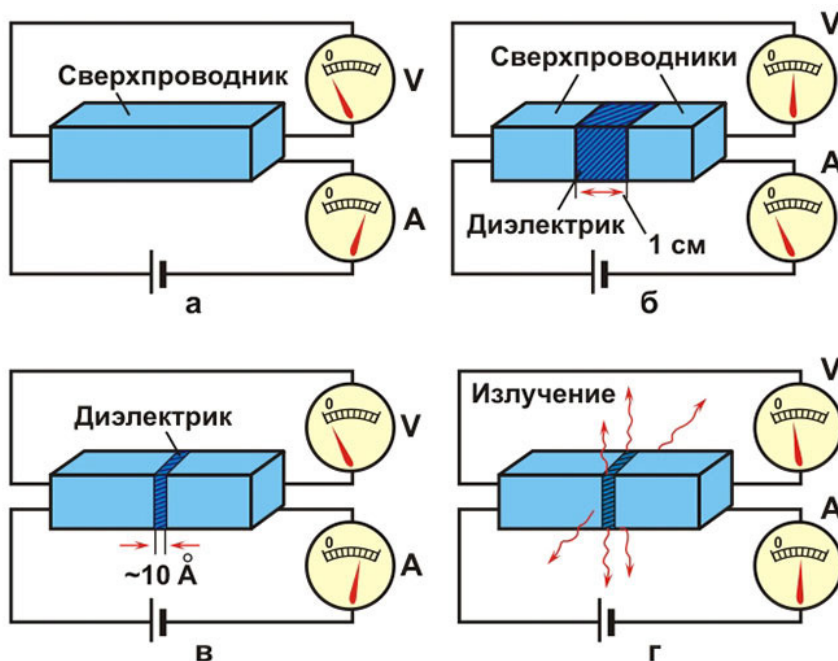


Рис. 42. Схемы экспериментов, объясняющих эффект Джозефсона

При включении в электрическую цепь сверхпроводника падение напряжения на нем равно нулю (рис. 42а).

При включении в электрическую цепь сверхпроводника, разделенного диэлектриком значительной толщины, тока в цепи нет, вольтметр показывает ЭДС батареи (рис. 42б).

При включении в электрическую цепь сверхпроводника, разделенного диэлектриком незначительной толщины ($\sim 10^{-10}$ м) существует ток сверхпроводимости (стационарный ДЭ) (рис. 42в).

При включении в электрическую цепь сверхпроводника, разделенного диэлектриком незначительной толщины, и при наличии тока в цепи, величина

которого превышает критическую, возникает напряжение на джозефсоновском контакте и в нём возникает электромагнитное излучение (нестационарный ДЭ) (рис. 42г).

Возникновение излучения связано с тем, что объединённые в пары электроны, создающие сверхпроводящий ток, при переходе через контакт приобретают избыточную по отношению к основному состоянию сверхпроводника энергию. Единственная возможность для пары электронов вернуться в основное состояние — это излучить квант электромагнитной энергии.

Аналогичный эффект наблюдается и в том случае, когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или точечным контактом) или между ними находится тонкий слой металла в нормальном состоянии. Такие системы вместе с контактами Джозефсона называют слабосвязанными сверхпроводниками.

При этом критический ток оказывается зависящим от внешнего магнитного поля, что позволяет использовать такие устройства для чрезвычайно точного измерения магнитных полей.

На основе ДЭ созданы сверхпроводящие магнитометры для медицинских исследований (магнитоэнцефалография, магнитогастрография, магнитный маркерный мониторинг, исследование сердца), технических (ядерный магнитный резонанс), горно-геологических (геофизическая разведка, палеомагнитный метод изучения горных пород).

6. Датчики концентрации

Концентрация – отношение числа частиц компонента системы (смеси, раствора, сплава), его количества (молярная концентрация) или массы (массовая концентрация) к объему системы [15].

ИЮПАК¹ под **концентрацией** компонента понимает четыре величины: соотношение молярного, или численного количества компонента, его массы, или объёма исключительно к объёму раствора. Типичные единицы измерения – соответственно моль/л, л⁻¹, г/л, и безразмерная величина.

Безразмерное соотношение одной из трёх однотипных величин – массы, объёма или количества вещества ИЮПАК называет *долей* компонента. Однако на практике термин «концентрация» применяют и для долей, не являющихся объёмными долями, а также к соотношениям, не описанным ИЮПАК. Оба термина могут применяться к любым смесям, включая механические смеси, но наиболее часто применяются к *растворам*.

Получение информации – из каких химических элементов состоит анализируемый образец и какова их концентрация – является задачей элементного анализа аналитической химии. Классификация методов элементного анализа чрезвычайно обширна. К основным группам относят [16]:

1. Спектроскопические методы анализа:
 - 1) атомно-эмиссионный спектральный анализ;
 - 2) атомно-абсорбционный спектральный анализ;
 - 3) фотометрические методы анализа;
 - 4) инфракрасная спектроскопия;

¹ Международный союз теоретической и прикладной химии (англ. International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) – международная неправительственная организация в области химии. Является членом Международного совета по науке (англ. International Council for Science, ICSU). ИЮПАК создан в 1919 г. Академия наук СССР стала национальной организацией-участницей ИЮПАК в 1930 г.

- 5) люминесцентные методы анализа;
- 2. Радиометрические (ядерно-физические) методы анализа:
 - 1) качественная идентификация радиоактивных изотопов;
 - 2) количественное определение элементов по радиоактивности их изотопов:
 - анализ, основанный на измерении естественной радиоактивности;
 - анализ, основанный на искусственной (наведенной) радиоактивности;
 - метод радиоактивных индикаторов;
- 3. Электрохимические методы анализа:
 - 1) потенциометрия;
 - 2) вольтамперометрия (полярография);
 - 3) амперометрическое титрование;
 - 4) кулонометрия;
- 4. Хроматографические методы анализа:
 - 1) жидкостная хроматография:
 - ионообменная хроматография;
 - плоскостная хроматография;
 - 2) газовая и газо-жидкостная хроматография.

Датчик концентрации — это устройство, предназначенное для определения отношения долей компонента (массы, объема или количества вещества) контролируемого объекта посредством преобразования изменения отношения долей компонента в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

Наибольшее распространение среди датчиков концентрации получили потенциометрические¹ (*pH-метры*) и электрохимические резистивные датчики.

¹ Потенциометрия — метод определения различных физико-химических величин, основанный на измерении электродвижущих сил (ЭДС) цепей. Данные цепи состоят из двух основных элементов: измерительного электрода и электрода сравнения.

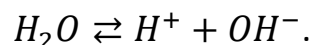
6.1. pH-метры

pH-метры – датчики для измерения водородного показателя (pH , лат. *pondus Hydrogenii* – «вес водорода») – относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости ЭДС чувствительного элемента от **концентрации** ионов водорода в электролите¹ [17].

Водородный показатель – мера активности ионов² водорода в растворе. В разбавленных растворах он эквивалентен их концентрации. Равен по модулю и противоположен по знаку десятичному логарифму активности водородных ионов, выраженной в молях на один литр

$$pH = -\lg \alpha_{(H^+)}.$$

Процесс распада электролита на ионы называют *электролитической диссоциацией*. В качестве примера рассмотрим воду, молекулы которой частично диссоциируют на ионы водорода H^+ и ионы гидроксила OH^- по схеме



При этом остается постоянной так называемая *константа диссоциации*

$$K = \frac{\alpha_{(H^+)} \cdot \alpha_{(OH^-)}}{\alpha_{(H_2O)}},$$

где $\alpha_{(H^+)}$, $\alpha_{(OH^-)}$ и $\alpha_{(H_2O)}$ — соответственно, активности ионов H^+ , OH^- и воды.

В разбавленных растворах активность воды $\alpha_{(H_2O)}$ можно считать постоянной, и тогда произведение $K \cdot \alpha_{(H_2O)}$ становится новой постоянной, которую называют *ионным произведением воды*

$$K_{(H_2O)} = \alpha_{(H^+)} \cdot \alpha_{(OH^-)}.$$

Установлено, что при 22°C ионное произведение воды $K_{(H_2O)} = 10^{-14}$ моль/л.

¹ Электролит – вещество, расплав или раствор, в котором содержится большая концентрация ионов, обеспечивающих прохождение электрического тока.

² Активность (ионов) — эффективная концентрация с учетом электростатического взаимодействия между ионами в растворе. Активность отличается от концентрации на некоторую величину. Отношение активности (α) к концентрации вещества в растворе (c) называется коэффициентом активности $\gamma = \alpha/c$.

В чистой воде или в нейтральном растворе активности H^+ и OH^- равны

$$\alpha_{(H^+)} = \alpha_{(OH^-)} = \sqrt{K_{(H_2O)}} = 10^{-7} \text{ моль/л.}$$

Следовательно, водородный показатель

$$pH = -\lg \alpha_{(H^+)} = -\lg(10^{-7}) = 7.$$

При добавлении кислоты к воде ионов водорода H^+ становится больше, т.е. возрастает их концентрация, а концентрация гидроксид-ионов OH^- понижается. А при добавлении основания — напротив, увеличивается содержание гидроксид-ионов, а концентрация ионов водорода уменьшается. При $\alpha_{(H^+)} > \alpha_{(OH^-)}$ полагают, что раствор кислый, а при $\alpha_{(OH^-)} > \alpha_{(H^+)}$ — щелочной, т.е., для кислых растворов $pH > 7$, а для щелочных $pH < 7$.

На рис. 43 показана принципиальная схема потенциометрического гальванического датчика.

Гальванический датчик состоит из двух элементов: измерительного электрода 2, помещаемого в исследуемый раствор 1, и электрода сравнения 3, электродный потенциал которого должен оставаться постоянным.

В качестве измерительного электрода в настоящее время используют специальный стеклянный электрод.

Стеклянный электрод — это мембранный селективный электрод на H^+ , состоящий из стеклянной трубки, заканчивающейся тонкостенным шариком из специального стекла (мембрана). Устройство стеклянного электрода представлено на рис. 44 [18].

Современный стеклянный электрод представляет собой шарик из специального электродного стекла, припаянный к обычной стеклянной трубке. В шарик налит раствор соляной кислоты HCl ($0,1 \text{ моль/дм}^3$), в который погружен хлорсеребряный электрод.

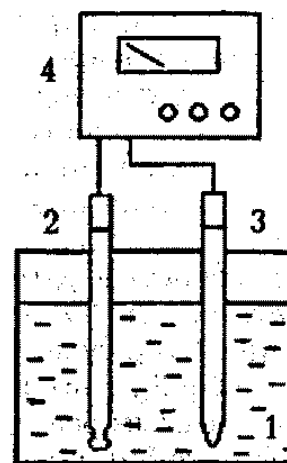
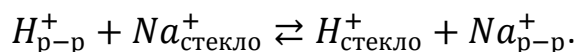


Рис. 43. Принципиальная схема потенциометрического гальванического датчика

Когда электрод помещают в раствор соляной кислоты, в поверхностный слой электродного стекла интенсивно проникают из исследуемого раствора ионы водорода, вытесняя из стекла щелочные ионы (Na^+ или Li^+).

ЭДС возникает за счет ионообменного процесса мембраны и раствора



Способность к ионному обмену зависит от химического состава стекла и состава раствора. Различное энергетическое состояние ионов Na^+ и H^+ в стекле и в растворе приводит к тому, что ионы H^+ так распределяются между ними, что между поверхностью (внешней и внутренней) возникает разность потенциалов. Так как концентрация ионов водорода H^+ в растворе HCl постоянна, а на внешней поверхности стекла потенциал – переменная величина, то эта разность зависит от концентрации H^+ в исследуемом растворе.

Потенциал стеклянного электрода зависит от сорта стекла, поэтому перед применением его калибруют по буферным растворам с определенной концентрацией ионов водорода.

Электрод сравнения предназначен для измерения электродных потенциалов. Необходимость его использования обусловлена невозможностью измерения абсолютной величины потенциала измерительного электрода. В качестве электрода сравнения может быть использован электрод, обладающий постоянным и не зависящим от состава раствора потенциалом. При этом обязательно знать числовую величину потенциала. Значение потенциала должно воспроизводиться и не изменяться от опыта к опыту. Существенными требованиями к электродам сравнения являются низкое электрическое сопро-

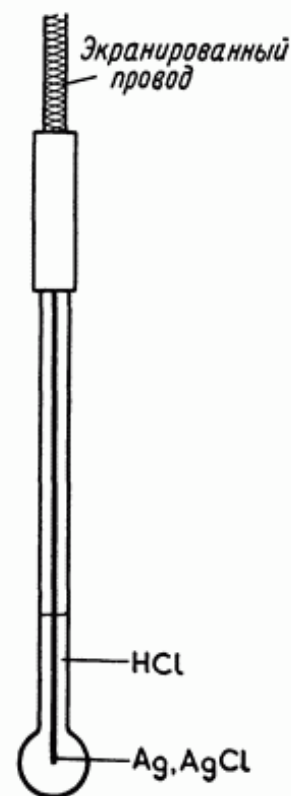


Рис. 44. Устройство стеклянного электрода

тивление, отсутствие влияния на состав анализируемого раствора, способность не вызывать появления значительного диффузионного потенциала и простота конструкции.

В качестве электрода сравнения, благодаря стабильности потенциала и простоте конструкции, чаще всего используют хлорсеребряный электрод (ХСЭ) [19]. Устройство ХСЭ показано на рис. 45.

Электрод представляет собой серебряную пластинку или проволочку 6, на которую нанесен слой хлорида серебра, и погруженную в раствор хлорида калия KCl , насыщенный $AgCl$ 4. Раствор KCl солевым мостиком 7 связан с анализируемым раствором. Асбестовая нить 2 служит для затруднения диффузии внешнего раствора внутрь электрода.

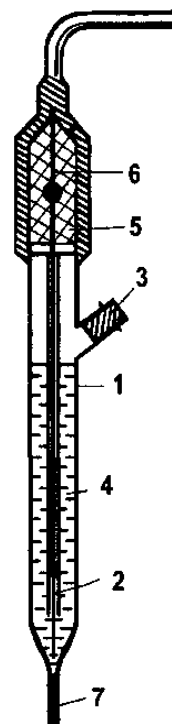
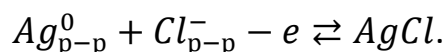


Рис. 45. Устройство хлорсеребряного электрода:

- 1 - корпус; 2 - асбестовая нить;
- 3 - резиновая пробка и отверстие для заливки раствора KCl ;
- 4 - раствор KCl ;
- 5 - слой $AgCl$;
- 6 - серебряная проволока;
- 7 - солевой мостик

Потенциал этого электрода зависит исключительно от концентрации (активности) хлорид-иона Cl^- , находящегося в равновесии с твердым хлоридом серебра



ЭДС на выводах преобразователя является алгебраической суммой потенциалов всех элементов цепи.

При изменении pH исследуемого раствора изменяется только потенциал наружной поверхности электрода, который зависит от активности водородных ионов в растворе. Все же остальные составляющие ЭДС остаются неизменными (при постоянной температуре). Поэтому, измеряя ЭДС на выводах преобразователя со стеклянным электродом, можно определить pH исследуемого раствора.

Стеклянный электрод может применяться для измерения pH не только в водных, но и в неводных и смешанных средах.

Конструкции стеклянных электродов весьма разнообразны. Для измерения pH кожи, бумаги применяются стеклянные электроды с плоской мембраной, для измерений в вязких средах и для медицинских целей – копьевидные и игольчатые электроды.

pH -метры используются при высокотехнологичном производстве всех видов горючего, в фармакологической, косметической, лакокрасочной, химической, пищевой промышленности, промышленной теплоэнергетике и др.

6.2. Электрохимические резистивные датчики (кондуктометрические)

Кондуктометрические датчики относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **сопротивления** чувствительного элемента от **состава и концентрации** используемого электролита.

Кондуктометрические датчики для измерения концентрации (проводимости) растворов разделяют на **контактные**, электроды которых помещаются в контролируемый раствор, и **бесконтактные** [17].

6.2.1. Контактные кондуктометрические датчики

Датчики представляют собой плоскопараллельные, коаксиальные или точечные электроды, изготавливаемые из платины, графита, нержавеющей стали или других материалов, химически не взаимодействующих с раствором.

Конструкция датчика показана на рис. 46.

Он состоит из обтекаемого стеклянного корпуса 1 и двух платиновых электродов 2 и 3. Диаметр центрального электрода 2 в зоне контакта с жидкостью выбирается равным 20...500 мкм, что позволяет сконцентрировать 90 % измеряемого сопротивления в очень малом объеме вблизи этого электрода и измерять локальные неоднородности поля электропроводимости.

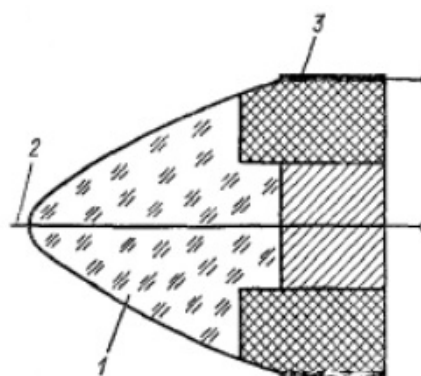


Рис. 46. Конструкция контактного кондуктометрического датчика

Для уменьшения погрешности от поляризации и загрязнения

электродов иногда используют четырехэлектродные преобразователи с двумя токовыми 1 и двумя потенциальными 2 выводами, с которых снимается измеряемое напряжение (рис. 47).

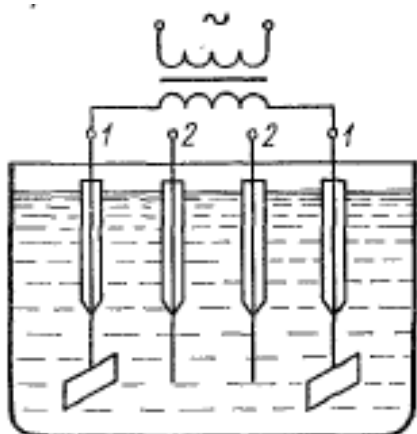


Рис. 47. Конструкционная схема четырехэлектродного преобразователя

Недостатками являются невысокая чувствительность и нестабильность коэффициента преобразования из-за загрязнения микроэлектрода.

6.2.2. Бесконтактные кондуктометрические датчики

Эти датчики не имеют контакта металлических электродов с электролитом, что исключает поляризацию и другие нежелательные взаимодействия электрода и раствора. Их разделяют на низкочастотные ($f \leq 40...50$ кГц) и высокочастотные.

Низкочастотные бесконтактные кондуктометрические датчики

На рис. 48 показана принципиальная схема с короткозамкнутой жидкостной вторичной обмоткой.

Изменение электропроводности раствора приводит к изменению сопротивления вторичной обмотки и, следовательно, сопротивления первичной обмотки. При уменьшении электропроводности уменьшается ток через указатель.

На рис. 49 показан датчик с жидкостным витком, являющимся вторичной обмоткой входного 1 и первичной обмоткой выходного 2 трансформаторов.

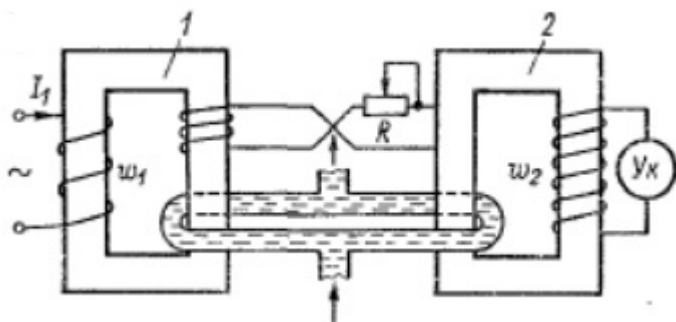


Рис. 49. Принципиальная схема датчика с жидкостным витком

На рис. 50 изображен капиллярно-трансформаторный датчик с жидкостным витком. Входной $Tr1$ и выходной $Tr2$ трансформаторы выполнены на тороидальных ферритовых сердечниках и помещены в герметичный пластмассовый корпус 1 со стеклянной насадкой 2, имеющей капиллярное отверстие 3. Жидкостный виток, связывающий трансформаторы $Tr1$ и $Tr2$, образуется жидкостью в капилляре и канале корпуса 4 и жидкостью, омывающей преобразователь снаружи. Сопротивление жидкости в капилляре на порядок больше сопротивления остальной части жидкостного витка связи. Малые диаметр и длина капилляра

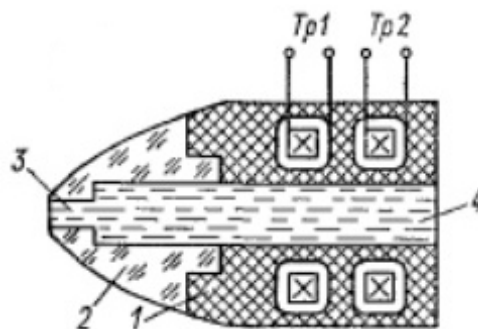


Рис. 50. Конструкционная схема капиллярно-трансформаторного датчика с жидкостным витком

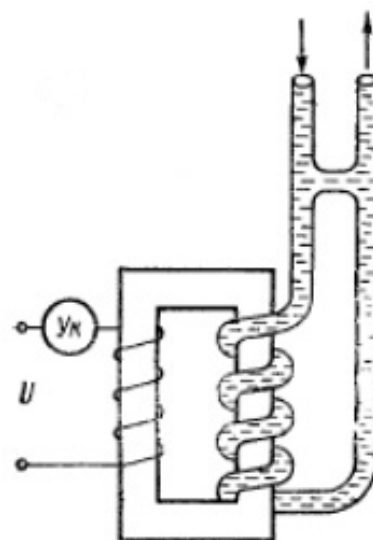


Рис. 48. Принципиальная схема датчика с короткозамкнутой жидкостной вторичной обмоткой

При начальной проводимости раствора указатель $Ук$ регулировкой реостата R устанавливается на нуль.

обеспечивают высокую пространственную разрешающую способность преобразователя, а большая плотность тока в капилляре – высокую чувствительность. По сравнению с контактным преобразователем (см. рис. 46), бесконтактный преобразователь характеризуется большей точностью измерений.

Высокочастотные бесконтактные кондуктометрические датчики

Эти датчики разделяют на емкостные (рис. 51а, б), и индуктивные (рис. 51в).

Электроды располагаются снаружи тонкостенной изоляционной трубки с контролируемым раствором. У погружных датчиков они находятся внутри закрытой трубки, которая помещается в раствор.

Датчики включают в резонансный контур, питаемый от генератора с частотой несколько десятков мегагерц. Измерение концентрации при этом сводится к измерению добротности контура.

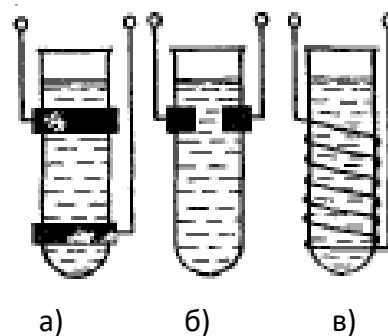


Рис. 51. Конструкционные схемы высокочастотных бесконтактных кондуктометрических датчиков

7. Датчики температуры

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы [5, т.3, с. 418].

Иными словами, температура – это мера кинетической энергии, обусловленной тепловым движением молекул объекта, т.е. потенциалом теплового потока [20].

Тепло (теплота) есть энергия, обусловленная разностью температур между объектом и окружающей средой.

Тепло может передаваться от одного объекта к другому следующими способами [21]:

- теплопроводностью – диффузией через среду;
- конвекцией – движением среды;
- излучением – с помощью электромагнитных волн.

Для измерения температуры в настоящее время действует Международная температурная шкала МТШ-90, которая является обязательной для всех метрологических органов. Она основывается на ряде воспроизводимых состояний равновесия (реперных точек) некоторых веществ, которым присвоены определенные значения температуры в градусах Кельвина (K) и Цельсия ($^{\circ}C$).

Из определения температуры следует, что она не может быть количественно измерена непосредственно. Поэтому температуру определяют косвенно — по изменению физических свойств различных тел, получивших название термометрических. Измерение температуры связано с преобразованием сигнала измерительной информации (температуры) в какое-либо свойство, связанное с температурой (объем, давление, электрическое сопротивление, термоЭДС, интенсивность излучения и т.д.).

Датчик температуры — это устройство, предназначенное для определе-

ния температуры контролируемого объекта посредством преобразования изменения свойств объекта в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

Датчики, предназначенные для измерения температуры, называются **термометрами**.

По способу преобразования термометры наиболее часто подразделяют на следующие виды:

- расширения;
- давления;
- терморезистивные;
- термоэлектрические;
- пирометры.

7.1. Термометры расширения

Термометры расширения относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **линейных размеров** чувствительного элемента от **температуры** объекта.

Принцип действия термометров расширения основан на *эффекте теплового расширения* – изменение линейных размеров и формы тел при изменении их температуры.

Термометры расширения разделяют на две группы: металлические и жидкостные термометры.

7.1.1. Металлические термометры расширения

Металлические термометры расширения изготавливают в виде биметаллических термометров и дилатометров.

Биметаллические термометры

На рис. 52 представлена принципиальная схема биметаллического термометра, в котором в качестве термочувствительного элемента используется двухслойная пластинка, состоящая из металлов с существенно различными коэффициентами линейного расширения: латуни 1 и инвара 2.

При увеличении температуры свободный конец пластины будет изгибаться в сторону металла с меньшим коэффициентом. По величине этого перемещения судят о температуре.

Эти датчики часто используются как термореле в системах сигнализации и автоматического регулирования, а также в качестве температурных компенсаторов в измерительных устройствах, например, в пирометрах, термометрах давления и т.п.

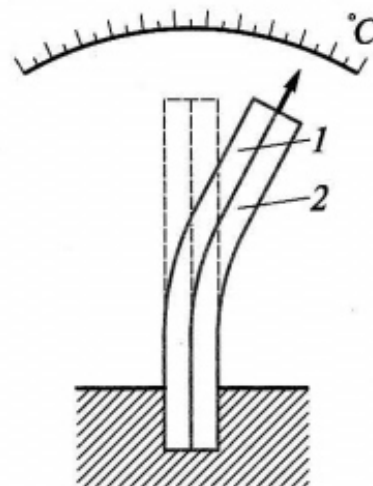


Рис. 52. Принципиальная схема биметаллического термометра

Дилатометры

На рис. 53 приведена конструкционная схема пневматического дилатометра.

В корпусе 1, изготовленном из латуни (нержавеющей стали) расположены трубка 3 и стержень 2, выполненный из инвара (кварца). Стержень 2 через трубку 3 и толкатель 5 с помощью пружины 6 постоянно поджимается к нижнему концу корпуса 1. Шарик 4 исключает появление люфтов между стержнем и компенсационной трубкой, которая выполнена также из латуни и предназначена для исключения температурной погрешности при установке на объ-

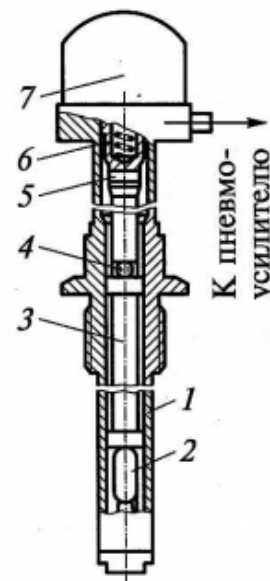


Рис. 53. Конструкционная схема пневматического дилатометра

ектах с различной толщиной тепловой изоляции. Изменение разности удлинений корпуса 1 и стержня 2, пропорциональное изменению температуры измеряемой среды, трансформируется в пневматический сигнал в преобразователе 7, усиливается и поступает на регистрирующий прибор.

7.1.2. Жидкостные термометры расширения

Жидкостные термометры разделяют на палочные (рис. 54а) и технические со вложенной шкалой (рис. 54б).

Жидкостный термометр состоит из стеклянной оболочки 4, капиллярной трубки 2, запасного резервуара 1 и шкалы 3. Термометрическая жидкость заполняет резервуар и часть капиллярной трубки. Свободное пространство в капилляре заполняется инертным газом, или из него удаляется воздух.

В качестве термометрической жидкости применяют органические заполнители: толуол, этиловый спирт, керосин, пентан. Наиболее широкое распространение получили термометры с ртутным наполнением. Это объясняется свойствами ртути находиться в жидком состоянии в широком диапазоне температур и не смачивать стекло, что позволяет использовать капилляры с небольшим диаметром канала (до 0,1 мм) и обеспечивать высокую точность измерения.

Органические заполнители характеризуются более низкой температурой применения, меньшей стоимостью, большей погрешностью измерения.

Жидкостные термометры в зависимости от назначения и области применения подразделяются на образцовые, лабораторные, технические, бытовые, метеорологические.

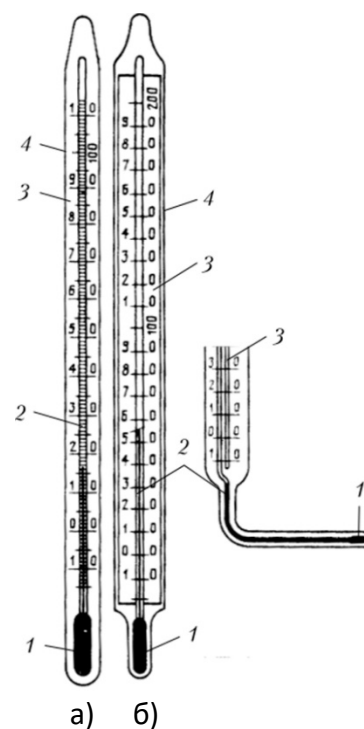


Рис. 54. Конструкционные схемы жидкостных стеклянных термометров

В качестве технических применяют только термометры со вложенной шкалой, которые имеют две модификации: прямые и угловые. Допускаемая погрешность обычно равна цене деления. При стационарной эксплуатации в различных точках технологических агрегатов термометры устанавливают в специальных металлических защитных чехлах (кожухах).

Для обеспечения задач позиционного регулирования и сигнализации в лабораторных и промышленных установках применяют специальные электроконтактные технические термометры двух типов:

1) с постоянными впаянными контактами, которые обеспечивают замыкание и размыкание электрических цепей при одной, двух или трех заранее заданных температурах;

2) с одним подвижным контактом (перемещается внутри капилляра с помощью магнита) и вторым неподвижным, впаянным в капилляр, что обеспечивает замыкание и размыкание электрической цепи при любом значении выбранной температуры.

Перемещающаяся в капилляре ртуть размыкает или замыкает цепи между контактами, к которым подводится напряжение постоянного или переменного тока.

7.2. Термометры давления

Термометры давления относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **давления** чувствительного элемента от **температуры** объекта.

Принцип действия термометров давления основан на *эффекте изменения давления* тела (жидкости или газа) внутри замкнутого объема при изменении температуры.

На рис. 55 представлена конструкция термометра давления.

Он состоит из термобаллона 4, капилляра 5 и манометрической одно- или многовитковой пружины 6. Капилляр 5 соединяет термобаллон с неподвижным концом манометрической пружины. Подвижный конец пружины запаян и через шарнирное соединение 7, поводок 3, сектор 2 связан со стрелкой прибора 1.

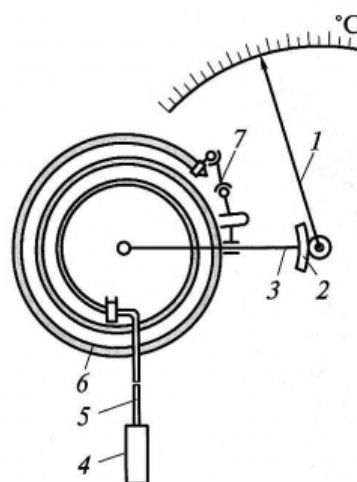


Рис. 55. Конструкция термометра давления

При изменении температуры среды изменяется давление термометрического вещества в замкнутом пространстве, в результате чего чувствительный элемент (манометрическая пружина) деформируется и ее свободный конец перемещается. Данное перемещение преобразуется в поворот регистрирующей стрелки относительно шкалы прибора.

В зависимости от термометрического вещества манометрические датчики подразделяются на жидкостные, конденсационные и газовые термометры.

В **жидкостных термометрах** термосистема заполнена хорошо расширяющейся жидкостью (ртутью, керосином, лигроином и др.).

В **конденсационных термометрах** насыщенные пары некоторых низкокипящих жидкостей (ацетон, метилхлорид, этилхлорид) изменяют давление при изменении температуры.

В **газовых термометрах** термобаллон, капилляр и манометрическая пружина заполняются каким-либо инертным газом (азотом, гелием и др.).

На показания манометрических термометров значительное влияние оказывают внешние условия: изменения температуры окружающего воздуха, различная высота расположения термобаллона и пружины, колебания атмосферного давления.

Манометрические термометры имеют ограниченную длину линии связи от термобаллона к показывающему прибору, большую инерционность и динамическую погрешность.

Манометрические термометры применяют для измерения температуры охлаждающей воды, воздуха, жидкого и газообразного топлива, на установках для заправки и т. п.

7.3. Терморезистивные термометры

Терморезистивные термометры относят к датчикам параметрического типа, принцип действия которых основан на зависимости **электрического сопротивления** чувствительного элемента от **температуры** объекта.

Принцип действия терморезистивных термометров основан на *терморезистивном эффекте* – изменение электрического сопротивления тел при изменении температуры. Терморезистор был изобретён Самюэлем Рубеном в 1930 г.

Различают два типа терморезистивных термометров:

- термометры сопротивления (проволочные резисторы);
- термисторы (полупроводниковые резисторы).

7.3.1. Термометры сопротивления

Действие термометров сопротивления основано на том, что электрическое сопротивление металлов изменяется одновременно с изменением температуры.

Устройство термометра сопротивления показано на рис. 56.

Термометр сопротивления имеет чувствительный элемент 2 в виде тонкой проволоки, намотанной на каркас 1 (пластину из слюды), и помещенный

в защитный чехол 3. Используются три или четыре провода для компенсации температурных колебаний окружающей среды.

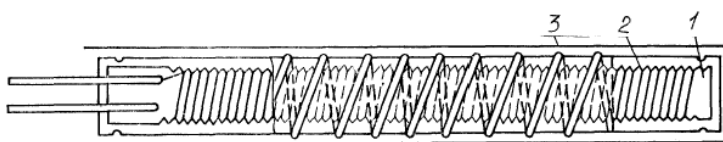


Рис. 56. Устройство термометра сопротивления

Номинальные функции преобразования (статические характеристики) медных и платиновых терморезисторов и их погрешность определяются [22].

Никелевые термометры сопротивления занимают промежуточное место, как более дешевые, чем платина, и более стойкие, чем медь.

Достоинства термометров сопротивления: стабильность, линейность, большой диапазон, дешевизна (для меди).

Недостатки: большие габариты, большая инерционность, малая величина сопротивления, окисляемость (для меди).

7.3.2. Термисторы

Действие термисторов основано на том, что электрическое сопротивление полупроводников изменяется одновременно с изменением температуры.

Различают два типа термисторов: NTC-термистор¹, сопротивление которого с ростом температуры падает – с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), и PTC-термистор², или позистор, у которого сопротивление с повышением температуры возрастает (с положительным ТКС).

Устройство термистора представлено на рис. 57.

Он состоит из корпуса 2 (металлического или из термостойкой пластмассы), внутри находится термосопротивление 1, герметично изолированное заливкой 4, к которому подсоединены выводы 3.

¹ NTC-термисторы, от слов «Negative Temperature Coefficient».

² PTC-термисторы, от слов «Positive Temperature Coefficient».

Термисторы изготавливаются в виде маленьких стерженьков, шайб, дисков и бусинок.

Термисторы изготавливаются из материалов с высоким ТКС, который обычно на порядок выше, чем ТКС металлов и метал-

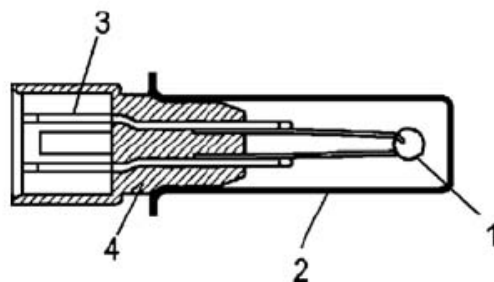


Рис. 57. Устройство термистора

лических сплавов. NTC-термисторы изготовляют из смеси поликристаллических оксидов переходных металлов (например, MnO , CoO_x , NiO и CuO), полупроводников¹ типа $A^{III} B^V$, стеклообразных, легированных полупроводников (Ge и Si) и других материалов. PTC-термисторы изготовляют из твёрдых растворов на основе $BaTiO_3$, что даёт положительный ТКС.

Достоинствами термисторов являются их малые размеры, а, следовательно, малая тепловая инерция и возможность измерять температуру в труднодоступных местах. Кроме того, высокое сопротивление (30000...40000 Ом) позволяет пренебречь сопротивлением подводящих проводников и переходным контактным сопротивлением.

Недостатком термисторов, ограничивающим внедрение их в промышленность, является нестабильность их характеристик во времени, слабая воспроизводимость свойств (что исключает их взаимозаменяемость), сравнительно невысокая максимальная рабочая температура и большой разброс температурного коэффициента.

Термисторы применяются для измерения и компенсации температуры в крупных бытовых электроприборах – холодильниках и морозильных камерах, посудомоечных машинах и другой технике. Эти устройства нашли широкое применение в автомобильной электронике. С их помощью измеряется

¹ Сложные полупроводниковые материалы объединяют по номеру группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева, к которой принадлежат компоненты соединения, и обозначают буквами латинского алфавита (A – первый элемент, B – второй и т.д.). Широкое применение получили следующие соединения $A^{III}B^V$ – $InSb$, $InAs$, InP , $GaSb$, GaP , $AlSb$, GaN , InN .

температура охлаждающей жидкости или масла, а также температурные показатели других элементов автомобиля.

В кондиционере термисторы устанавливаются в тепловом распределителе. Кроме того, они используются в качестве датчика слежения за температурой в комнате. С помощью термисторов осуществляется блокировка дверей бытовых приборов (т.наз. термозамок, напр. в стиральных машинах), они устанавливаются в нагреватели теплых полов и в газовые котлы.

Термисторы применяются, когда нужно определить уровень нестандартных жидкостей, например, жидкого азота. В целом, они получили самое широкое распространение в промышленной электронике.

7.4. Термоэлектрические термометры

Термоэлектрические термометры относят к датчикам генераторного типа, принцип действия которых основан на зависимости **ЭДС** чувствительного элемента от **температуры** объекта.

Принцип действия термоэлектрических термометров основан на *термоэлектрическом эффекте (эффекте Зеебека)* – возникновение ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах. Эффект был открыт в 1821 г. Т. И. Зеебеком.

Термоэлектрические термометры называют ***термопарами***.

Термопара представляет собой два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце [23]. Это соединение называется «горячим» спаем.

Принципиальная схема термопары представлена на рис. 58.

Измерительный элемент состоит из двух термоэлектродов 2 и 3 с горячим спаем T1, помещенных внутри оболочки. Каждый из электродов подключен к соединительным проводам 4 в месте вне оболочки T2, где температура известна и где измеряется напряжение. Эти соединения называются «холодный», или «опорный» спай.

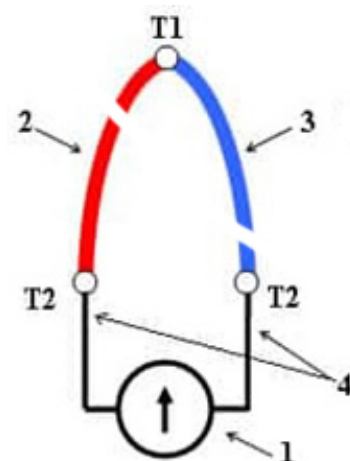


Рис. 58. Принципиальная схема термопары

Напряжение, измеряемое прибором 1 на холодном спае, зависит от разницы температур горячего и холодного спаев. Поэтому, необходимо знать температуру холодного спаев. Этот процесс называется *компенсацией холодного спаев* (КХС). КХС выполняется устройством управления, устройством аварийных отключений или другим устройством формирования сигнала.

В идеале измерение КХС выполняется как можно ближе к точке измерения, потому что длинные провода термопары очень чувствительны к электрическим помехам, и сигнал в них ухудшается.

Способы изготовления горячего спаев могут быть различные, включая скручивание, сжатие, пайку, в том числе и высокотемпературную, а также различные виды сварки, например, сварка узким швом и сварка встык (рис. 59).

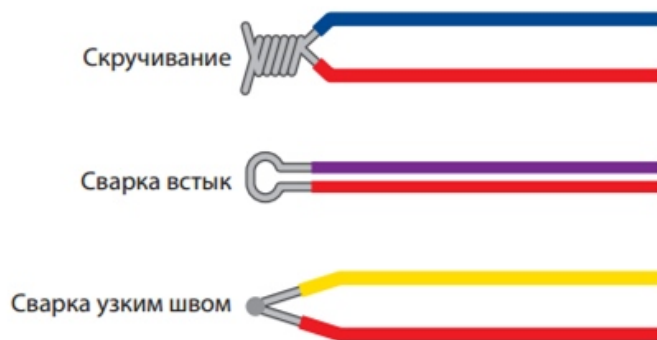


Рис. 59. Способы изготовления горячего спаев

Чтобы получить наилучшие рабочие характеристики, горячий спай должен быть механически прочным, электрически непрерывным, не загрязнен никакими химическими примесями материала-

лов, использующихся при сварке или пайке. При изготовлении высококачественных термопар большое внимание уделяется выбору марки проволоки и контролю процесса изготовления.

Спаи термопар изготавливаются в различных конфигурациях, каждая из которых имеет свои преимущества для применения в определенных системах. Спаи могут быть заземленными или незаземленными, а двухэлементные термопары могут быть изолированными или неизолированными (рис. 60).

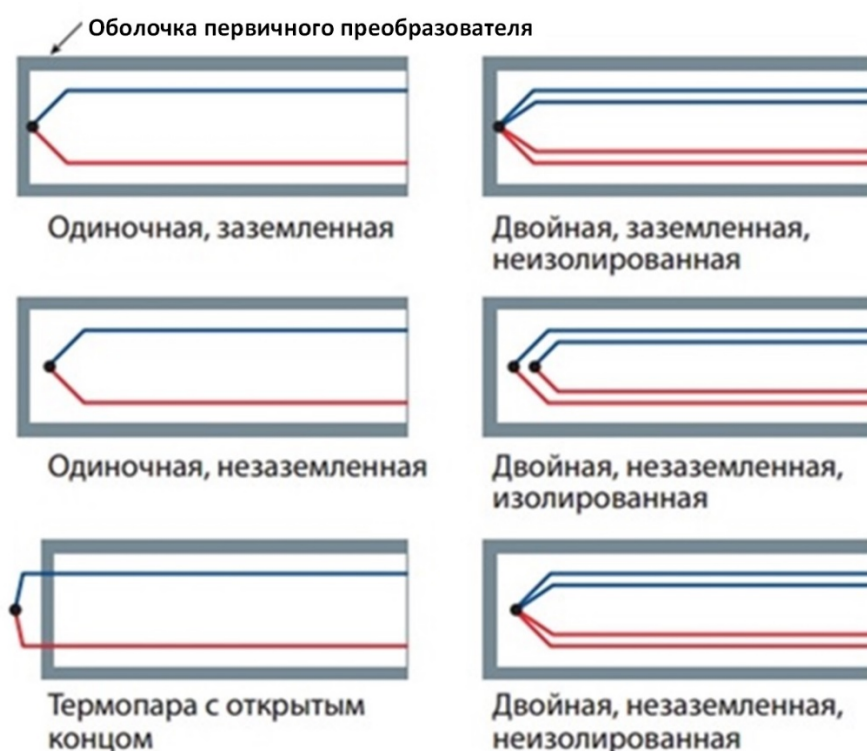


Рис. 60. Конфигурации горячих спаев

Наиболее часто применяются пары проводников:

- платинородий-платиновые;
- платинородий-платинородиевые;
- железо-константановые¹ (железо-медьникелевые);
- медь-константановые (медь-медьникелевые);
- нихросил-ниловые (никельхромникель-никелькремниевые);

¹ Константан – медно-никель-кобальтовый сплав [24].

- хромель¹-алюмелевые²;
- хромель-константановые;
- хромель-копелевые³;
- медь-копелевые.

Технические требования к термопарам определяются [23].

Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров – номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования, классы допуска и диапазоны измерений приведены в стандартах МЭК⁴ [25] и в [26].

Точный состав сплава термоэлектродов для термопар из благородных металлов в стандарте МЭК [25] не приводится. НСХ для хромель-копелевых и вольфрам-рениевых термопар определены только в [26]. В [25] данные термопары отсутствуют. По этой причине характеристики импортных датчиков из этих металлов могут существенно отличаться от отечественных. При этом, как правило, импортное оборудование не рассчитано на отечественный стандарт.

В настоящее время стандарт МЭК [25] пересматривается.

В 2008 г. МЭК ввел два новых типа термопар: золото-платиновые и платино-палладиевые. Новый стандарт МЭК [27] устанавливает стандартные таблицы для этих термопар из чистых металлов.

Термопарам присущи высокая точность измерения значений температуры (вплоть до $\pm 0,01$ °С), большой температурный диапазон измерения (от -250 °С до $+2500$ °С), простота, дешевизна, надёжность.

К недостаткам можно отнести следующие:

- 1) для получения высокой точности измерения температуры (до

¹ Хромель – никель-хромовый сплав [24].

² Алюмель – никель-алюминиевый сплав [24].

³ Копель – медно-никелевый сплав [24].

⁴ Международная электротехническая комиссия (МЭК; англ. International Electrotechnical Commission, IEC; фр. Commission électrotechnique internationale, CEI – международная некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий. Некоторые из стандартов МЭК разрабатываются совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO).

$\pm 0,01^{\circ}\text{C}$) требуется индивидуальная градуировка термопары;

2) на показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку. В современных конструкциях измерителей на основе термопар используется измерение температуры блока холодных спаев с помощью встроенного термистора или полупроводникового датчика и автоматическое введение поправки к измеренной термоЭДС;

3) эффект Пельтье¹ (в момент снятия показаний необходимо исключить протекание тока через термопару, так как ток, протекающий через неё, охлаждает горячий спай и разогревает холодный);

4) зависимость термоЭДС от температуры существенно нелинейна. Это создает трудности при разработке вторичных преобразователей сигнала;

5) возникновение термоэлектрической неоднородности в результате резких перепадов температур, механических напряжений, коррозии и химических процессов в проводниках приводит к изменению градуировочной характеристики и погрешностям до 5 К;

6) на большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей.

Применение термопар достаточно широкое: их используют в науке и промышленности; приспособлениями можно осуществлять измерение температуры для печей, газовой колонки, спаев, отработавших газов газовых турбин, дизелей и других промышленных процессов. Их также используют в частных домах, офисах и предприятиях. Они могут заменить термостаты в газовых отопительных приборах.

¹ Выделение или поглощение теплоты при прохождении тока через контакт (спай) двух разных проводников. Открыт в 1834 г. Ж. Пельтье.

7.5. Пирометры

Пирометры – приборы для измерения **температуры** тел по **интенсивности их теплового излучения** в оптическом диапазоне длин волн [5, т.3, с. 589].

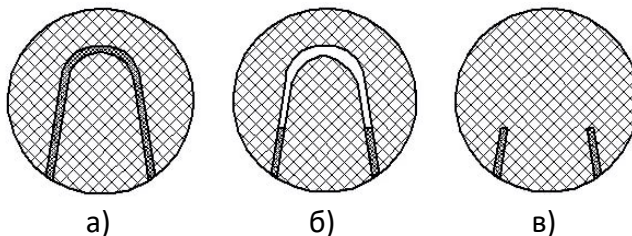
В зависимости от типа датчиков¹, различают типы пирометров:

- яркостные (оптические);
- цветные (фотоэлектрические);
- радиационные.

7.5.1. Яркостные пирометры

Действие яркостных пирометров (с исчезающей нитью) основано на сравнении его цвета с цветом эталонной накаливаемой электрическим током металлической нити в специальных измерительных (фотометрических) лампах накаливания. Изменяя с помощью реостата ток в цепи питания лампы, яркость накала ее нити устанавливается равной яркости исследуемого тела, и изображение нити исчезает на фоне тела (рис. 61).

При яркости нагретого тела больше яркости нити, нить темнеет на фоне изображения тела (рис. 61а).



При яркости нагретого тела меньше яркости нити, нить светится на фоне изображения тела (рис. 61б).

Рис. 61. Измерение температуры яркостным пирометром

При равенстве яркостей нагретого тела и нити яркостная температура нити равна яркостной температуре накаливаемого тела. При этом нить перестает

¹ Пирометры – это измерительные приборы, включающие в себя датчики. В соответствии с принятой классификацией, датчики пирометров относят к различным типам. Однако в силу чрезвычайной востребованности этих приборов в специфической области измерений температуры они представлены в этом разделе.

быть видимой и исчезает на фоне изображения тела (рис. 61в).

Принципиальная схема яркостного пирометра с исчезающей нитью показана на рис. 62.

При измерении наводят объектив 6 прибора на объект измерения 7, при этом фокусируется излучение на нить накала фото-

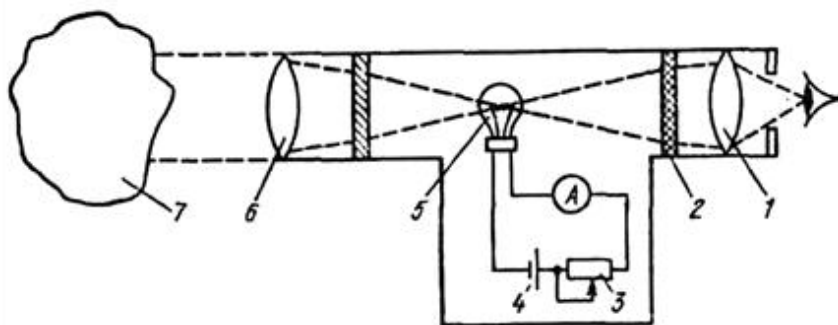


Рис. 62. Принципиальная схема яркостного пирометра с исчезающей нитью накала

метрической лампы 5. Оператор, измеряющий температуру тела, через линзу 1 и красный светофильтр 2 наблюдает за изображением нити на фоне поверхности нагретого тела, добиваясь одинаковой яркости излучения нити и тела регулированием (реостатом 3) тока, проходящего через нить лампы от источника питания 4. В случае если яркость нити меньше, чем яркость излучения тела, нить кажется черной на светлом фоне, и наоборот, если яркость нити больше, чем яркость излучения тела, она будет светлой линией на более темном фоне. При совпадении яркостей изображение нити сольется с фоном излучения тела, и она будет невидима измерителю. В этом случае по шкале миллиамперметра А определяют температуру тела.

Заметную погрешность могут вносить индивидуальные особенности глаза наблюдателя. У фотоэлектрических яркостных пирометров эта погрешность отсутствует.

7.5.2. Цветовые пирометры

Действие цветковых пирометров (мультиспектральных, спектрального отношения) основано на эффекте излучения телом при нагреве электромагнитных колебаний с различными длинами волн. Каждой температуре соответ-

ствует определенная длина волны, на которой интенсивность излучения максимальна.

Температура, измеряемая цветовыми пирометрами, называется *цветовой температурой* тела.

Цветовые пирометры измеряют температуру объекта, основываясь на результатах сравнения его теплового излучения в двух определенных участках спектра, каждый из которых характеризуется своей эффективной длиной волны. Это отношение для каждой температуры будет различным, и оно однозначно определяет температуру тела.

Цветовой пирометр отличается от яркостного тем, что перед объективом устанавливается вращающийся диск с красным и синим светофильтрами – обтюратор.

Наибольшее распространение получили цветовые пирометры, основанные на измерении отношения интенсивностей излучения в красной и синей областях спектра. В зависимости от того, используется ли для каждой из областей спектра отдельный приемник (фотоэлемент, фотодиод и т.п.), или оба спектра воздействуют на один и тот же приемник поочередно, пирометр выполняется по двухканальной или одноканальной схеме. Одноканальные спектрометры получили наибольшее распространение.

Принципиальная схема одноканального цветового пирометра представлена на рис. 63.

Излучение от нагретого тела 1 фокусируется оптической системой 2 на диске-обтюраторе 5 со светофильтрами 3 и 4, вращаемом синхронным электродвигателем 6. При вращении диска на фотопри-

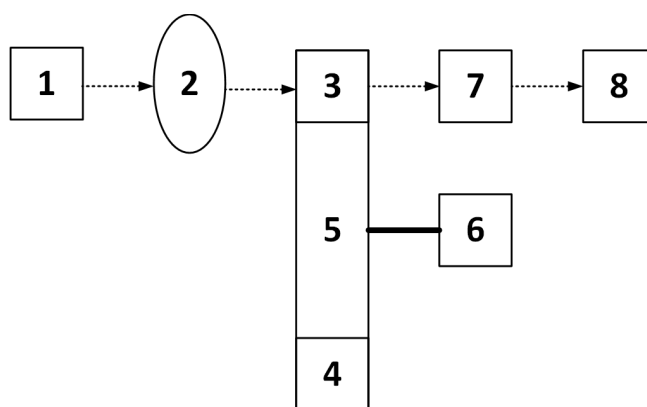


Рис. 63. Принципиальная схема цветового пирометра

емник 7 поочередно попадают потоки двух излучений. Воздействие светового излучения на фотоприемник вызывает появление на его выходе импульсов напряжения, пропорциональных интенсивности излучения двух участков спектра.

Поочередно воспринятые и усиленные излучения в каждом из участков спектра поступают на вход измерительного устройства 8. В измерительном приборе автоматически вычисляется логарифм отношения интенсивности излучений¹ и соответствующий сигнал поступает на дисплей.

7.5.3. Радиационные пирометры

Действие радиационных² пирометров (полного излучения, суммарного излучения) основано на зависимости мощности излучения нагретого тела от его температуры, описываемой законами излучения Стефана-Больцмана³ и Кирхгофа⁴.

Принципиальная схема радиационного пирометра представлена на рис. 64.

В этих пирометрах тепловой поток нагретого тела 1 концентрируется с помощью объектива 2 (линзы или вогнутого зеркала) на теплоприемнике 3, и затем сформированный сигнал передается на измерительное устройство 4.

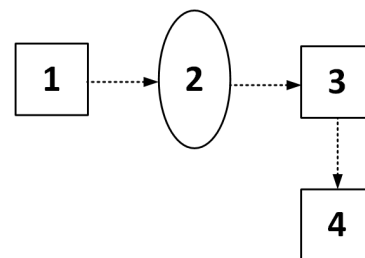


Рис. 64. Принципиальная схема радиационного пирометра

В качестве теплоприемника используют обычно термобатарей (несколько последовательно соединенных термопар) или термометр сопротивления.

¹ Логарифм спектрального отношения интенсивности излучений пропорционален обратным значениям цветовой температуры.

² Радиация от лат. radiatio «излучение».

³ Полная объёмная плотность равновесного излучения и полная испускательная способность абсолютно чёрного тела пропорциональны четвёртой степени его температуры.

⁴ Отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химической природы.

Пирометры с линзой называются рефракторными, а с вогнутым зеркалом – рефлекторными.

Истинную температуру определяют введением поправок с учетом коэффициента черноты реального тела, температуру которого измеряют. Для этого пользуются специальными таблицами коэффициентов черноты полного излучения материалов при различных истинных температурах, а также таблицами соотношений между температурой, измеренной радиационным пирометром, или радиационной температурой, и истинной температурой, в зависимости от коэффициента черноты полного излучения.

Так как радиационный пирометр воспринимает энергию во всем спектре излучения, то на его показания влияют пыль и сажа, а также углекислый газ и водяные пары, содержащиеся в воздухе.

Библиографический список

1. Большая советская энциклопедия / гл.ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1972. Т.7.
2. ГОСТ Р 51086-97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Госстандарт России, 2014.
4. ФРАЙДЕН Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005.
5. Физическая энциклопедия. В 5 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1998.
6. КЕЛИМ Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики: учеб. пособ. для средн. проф. учеб. заведений – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2004.
7. АРМЕНСКИЙ Е.В., ФАЛК Г.Б. Электрические микромашинны: учеб. пособ. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1985.
8. ГИНЗБУРГ В.Б. Магнитоупругие датчики. – М.: Энергия, 1970.
9. ГУМАНЮК М.Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. – Киев: Техника, 1965.
10. КИРЕЕВ П.С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975.
11. МИХЕЕВ В.П., ПРОСАНДЕЕВ А.В. Датчики и детекторы: учеб. пособ. – М.: Изд-во МИФИ, 2007.
12. КОЗЛОВ М.Г. Метрология и стандартизация: учебник. – СПб.: Изд-во Петерб. инс-та печати, 2001.
13. АХМЕДЖАНОВ Р.А., ЧЕРЕДОВ А.И. Физические основы получения информации: учеб. пособ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008.

14. КУЛИК И.О., ЯНСОН И.К. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах. – М.: Наука, 1970.
15. Химическая энциклопедия. В 5 т. / гл. ред. И.Н. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1990. Т.2.
16. БУЛАТОВ М.И. и др. Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа: текст лекций. – СПб.: СПбТИ(ТУ), 2010.
17. ЛЕВШИНА Е.С., НОВИЦКИЙ П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
18. ДЕВИС С., ДЖЕЙМС А. Электрохимический словарь. – М.: Мир, 1979.
19. ЖОЛНИН А.В. Общая химия: учебник. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014.
20. БРИНДЛИ К. Измерительные преобразователи: справ. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
21. ИСАЧЕНКО В.П. и др. Теплопередача. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981.
22. ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2011.
23. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
24. ГОСТ 492-2006. Никель. Сплавы никелевые и медноникелевые, обрабатываемые давлением. Марки. – М.: Стандартиформ, 2008.
25. IEC 60584-1 – 2013. Термопары. Часть 1. Спецификация и допуски для электродвижущей силы (EMF).
26. ГОСТ Р 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Стандартиформ, 2010.
27. IEC 62460 – 2008. Температура. Таблицы электродвижущей силы для комбинаций термопар из элементов без примесей.

Учебное издание

Юрий Витальевич Волков

ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2019 г., поз. 93

Подп. к печати 02.04.19.

Формат 60x84/16.

Бумага тип. № 1.

Печать офсетная.

Печ.л. 5,75.

Уч.-изд. л. 5,75.

Тираж 50 экз.

Изд. № 93.

Цена "С".

Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.