

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В. П. Михеев, А. В. Просандеев

# **Датчики и детекторы**

Ученое пособие

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

**Москва 2007**

УДК 681.56(075) + 539.1.07(075)  
ББК 32.96 – 04я7 + 22.38я7  
М 69

Михеев В.П., Просандеев А.В. Датчики и детекторы: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007. – 172 с.

Рассматривается широкий класс датчиков и детекторов, применяемых для измерения различных физических величин.

Учебное пособие предназначено для студентов, специализирующихся по электронике и автоматике физических установок, поддерживает курс «Теоретические основы специальности: датчики и детекторы», читаемый на кафедре Автоматики МИФИ.

Учебное пособие может быть полезно также специалистам, работающим в области физического эксперимента.

Учебное пособие подготовлено в рамках  
Инновационной образовательной программы.

*Рецензент* доц. Н.Н. Нечаев.

Верстка книги полностью соответствует  
предоставленному автором оригиналу-макету.

ISBN 978 – 5 – 7262 – 0802 – 2

©Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Основные понятия и определения.....	6
2. Физические основы работы датчиков.....	12
2.1. Генераторные датчики.....	12
2.2. Параметрические датчики.....	15
2.3. Источники погрешностей параметрических преобразователей.....	17
2.3.1. Резистивные преобразователи.....	17
2.3.2. Емкостные датчики.....	26
2.3.3. Индуктивные датчики.....	30
3. Датчики температуры.....	35
3.1. Шкалы температур.....	35
3.2. Термоэлектрические преобразователи.....	38
3.3. Металлические термометры сопротивления (терморезисторы).....	46
3.4. Полупроводниковые термодатчики.....	48
3.5. Измерение температуры по тепловому шуму.....	53
3.6. Диэлектрические измерители температур.....	54
3.7. Кварцевый термометр.....	56
3.8. Радиационные термометры.....	59
3.9. Термометры, использующие эффект расширения материалов.....	60
4. Датчики механических величин.....	64
4.1. Датчики линейных и угловых перемещений.....	64
4.2. Датчики деформаций.....	77
4.3. Тахометрические датчики.....	91
5. Датчики гидро-пневмостатических величин.....	105
5.1. Расходомеры с сужающими устройствами.....	105
5.2. Турбинные и вихревые расходомеры.....	108
5.3. Электромагнитные расходомеры.....	110
5.4. Тепловые измерители скорости и расхода.....	112
5.5. Чашечные и крыльчатые анемометры (вертушки).....	116
5.6. Лазерные и ультразвуковые анемометры.....	118
5.7. Измерение расхода с помощью радиоактивных добавок.....	120
5.8. Измеритель массового расхода, использующий силу Кориолиса.....	121

6. Датчики давления.....	124
6.1. Тензометрический метод.....	126
6.2. Пьезорезистивный метод.....	127
6.3. Емкостной метод.....	129
6.4. Резонансный метод.....	130
6.5. Индуктивный метод.....	131
6.6. Ионизационный метод.....	132
6.7. Заключение.....	132
7. Датчики влажности.....	136
8. Детекторы ядерного излучения.....	141
8.1. Виды ядерного излучения.....	141
8.2. Детекторы на основе ионизации газов.....	143
8.3. Сцинтилляционные детекторы.....	147
8.4. Полупроводниковые детекторы.....	148
9. Оптические датчики.....	151
9.1. Фотометрия.....	151
9.2. Фоторезисторы.....	153
9.3. Фотодиоды.....	155
9.4. Лавинные фотодиоды.....	158
9.5. Фототранзисторы.....	159
9.6. Фотоэмиссионные датчики.....	160
9.6.1. Вакуумный фотоэлемент.....	160
9.6.2. Газонаполненные фотоэлементы.....	161
9.6.3. Фотоэлектронные умножители.....	163
Список литературы.....	165
Приложение 1. Некоторые термины и определения к ним из области метрологии (в соответствии с РМГ 29-99).....	167

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу настоящего учебного пособия положен материал лекций, читаемых в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) для студентов, специализирующихся в области автоматизации физических установок.

Основное внимание уделено принципам работы датчиков различных физических величин и их метрологическим параметрам. Анализируются источники погрешностей и способы их компенсации.

Авторы благодарны доктору технических наук, профессору Рыбину Виктору Михайловичу за помощь в подборе литературы и ценные советы.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В любом производственном или научном процессе (и даже в быту) приходится сталкиваться с количественной оценкой различных физических величин. Для этого используются различные устройства от органов чувств до сложных измерительных систем.

Измерения физических величин всегда имеют определенную цель. Это либо контроль измеряемой величины, либо управление этой физической величиной. Под контролем будем понимать измерение физической величины без воздействия на нее.

Структурная схема контрольно-измерительной системы показана на рис.1.1, где О – объект; ИП – измерительный преобразователь; ЛС – линия связи; ПП – промежуточный преобразователь; УО – устройство отображения, а управляющей –

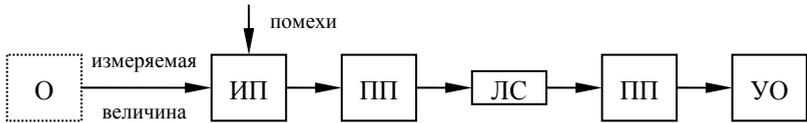


Рис. 1.1.

на рис.1.2, где ОР – объект регулирования; УМ – усилитель мощности; ИУ – исполнительное устройство.

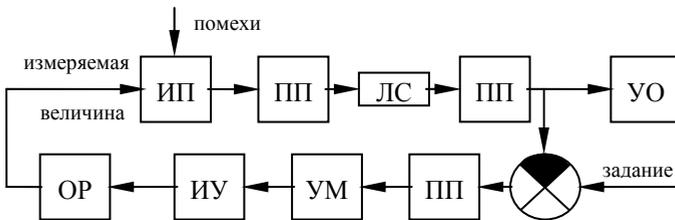


Рис. 1.2.

Во втором случае мы имеем систему автоматического регулирования. Все блоки этой системы являются *элементами*

автоматики, в том числе и измерительный преобразователь.

В общем случае (рис.1.3) выходная величина  $\alpha$  измерительного преобразователя является функцией многих переменных (или физических величин)  $\alpha = f(x, y_1 \dots y_n)$ . Рассмотрим основные определения, которыми мы будем пользоваться в дальнейшем.

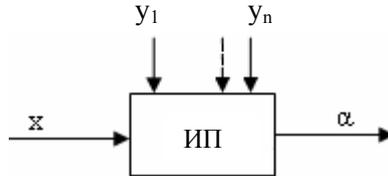


Рис. 1.3.

*Измерительное преобразование* представляет собой отражение одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

*Измерительный преобразователь* – это техническое устройство, выполняющее одно частное измерительное преобразование.

Работа ИП, как правило, происходит в сложных условиях, когда на ИП действует много параметров. Нас интересует обычно один параметр, который называется *измеряемой величиной*. Все остальные параметры процесса считаются помехами.

*Естественной входной величиной* называется величина, которую ИП лучше всего воспринимает на фоне помех.

*Естественная выходная величина* – это величина, которая больше всего изменяется в ИП.

По виду естественной выходной величины ИП подразделяются на *генераторные* и *параметрические*.

*Генераторные* преобразователи имеют в качестве выходной величины ток или ЭДС при постоянной величине выходного импеданса  $Z_{\text{вых}}$ .

*Параметрические* преобразователи под воздействием измеряемой величины изменяют один из своих параметров  $R$ ,  $L$  или  $C$ .

*Функция преобразования* ИП – это зависимость выходной величины от входной, описываемая аналитическим выражением или графиком. Лучше, когда эта зависимость линейна.

Для описания линейной характеристики ИП (рис. 1.4.)  $\alpha = \alpha_0 + Sx$  достаточно знать два параметра:  $\alpha_0$  – начальное значение выходной величины,  $S = \Delta\alpha/\Delta x$  – относительный наклон характеристики, который называется *чувствительностью преобразователя*.

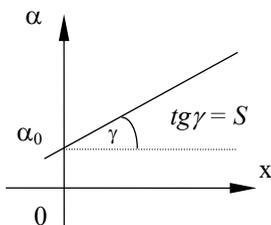


Рис. 1.4.

Чувствительность преобразователя – это, как правило, размерная величина, так как входная и выходная величины имеют различную физическую природу.

Чувствительность измерительного прибора, состоящего из последовательно соединенных нескольких ИП, равна произведению чувствительностей отдельных ИП.

При градуировке однотипных ИП оказывается, что их характеристики отличаются друг от друга, занимая некоторую полосу. В паспорте приводится средняя характеристика, которая называется *номинальной*. Разность между номинальной и реальной характеристиками рассматривается как *погрешность* ИП.

Погрешности имеют различный характер и определяются по-разному.

*Систематическая погрешность* не изменяется во времени и может быть практически полностью устранена введением поправок. Единственный способ их обнаружения состоит в проверке нуля и чувствительности при аттестации прибора по образцовым мерам.

Систематическая погрешность может быть также *неизменяемой* функцией какой-либо величины, тогда ее тоже можно учесть.

*Прогрессирующая погрешность* является медленно изменяющейся во времени (из-за процессов старения элементов). Процесс этот нестационарный, поэтому такую погрешность можно скорректировать только в *данный момент*.

*Случайные погрешности* – это такие погрешности, в появлении которых не удается установить закономерности. Они определяются совокупностью причин, трудно поддающихся анализу. Случайные погрешности характеризуются законом распределения их вероятностей и параметрами этого закона.

*Погрешность измерения* – это разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины.

*Погрешность линейности (нелинейность)*. Реальная зависимость  $\alpha = f(x)$  может быть нелинейной, хотя принимается линейной (рис. 1.5). *Нелинейность* – это разность между истинным и принятым значениями измеряемой величины в предположении, что система измерения линейна. На рисунке показана величина нелинейности  $N$ , когда измеренное значение равно  $\alpha_1$ . Нелинейность выражается как процентное отношение максимальной ошибки линейности к отклонению на всю шкалу прибора:

$$\text{нелинейность} = \frac{N_{\max}}{\alpha_{\max} - \alpha_0} \cdot 100\% .$$

*Разрешающая способность* – это минимальное изменение

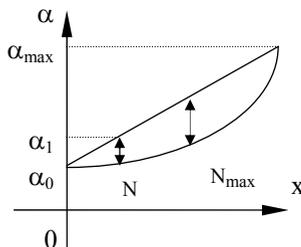


Рис. 1.5.

измеряемой величины, которое приводит к различному изменению в показаниях прибора. Для стрелочного прибора – это половина деления шкалы.

Разрешающая способность и погрешность не одно и то же, хотя она влияет на погрешность измерений.

*Порог чувствительности (ПЧ)* – это минимальный уровень входного сигнала, который должен быть достигнут для появления различимых изменений в показаниях прибора.

*Диапазон измерений* (динамический диапазон (ДД)) – это диапазон измеряемой величины, внутри которого могут быть проведены измерения (рис. 1.6, а, б).

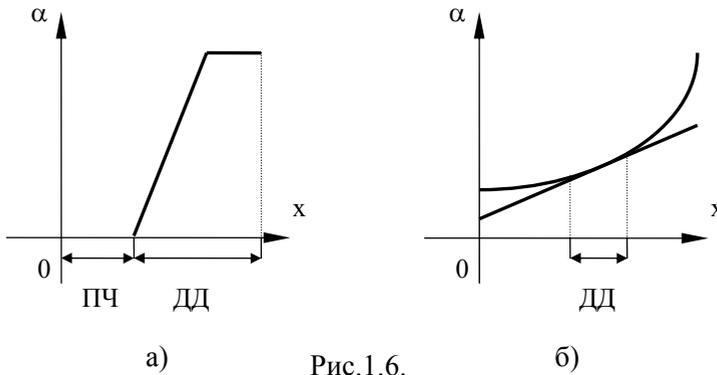


Рис.1.6.

К динамическим характеристикам датчиков относятся:

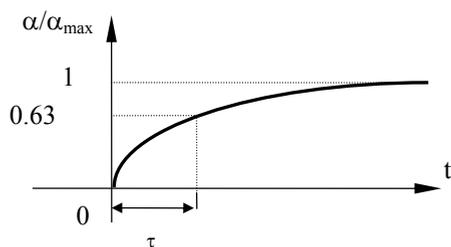
*Быстродействие* – это параметр датчика, позволяющий оценить, как выходная величина следует во времени за изменениями измеряемой величины.

*Полоса пропускания* – это диапазон частот, для которого чувствительность  $S$  не меньше  $\frac{S_{\max}}{\sqrt{2}}$  (рис. 1.7, а).

*Постоянная времени  $\tau$*  – промежуток времени, за который выходная величина достигает 0,63 от установившегося значения, при ступенчатом изменении входного сигнала (рис. 1.7, б).



а)



б)

Рис. 1.7.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается контрольно-измерительная система от управляющей системы?
2. Что такое измерительный преобразователь?
3. В чем заключается различие между генераторным и параметрическим датчиком?
4. Как определяется чувствительность преобразователя?
5. Назовите основные погрешности преобразователя.
6. Какими параметрами характеризуются динамические свойства преобразователя?

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ

По виду выходного сигнала датчики делятся на *генераторные* и *параметрические*.

### 2.1. Генераторные датчики

*Генераторные датчики* (или активные в зарубежной литературе) преобразуют измеряемую величину в электрическую форму энергии. В табл. 2.1 для примера приведены некоторые физические эффекты, которые используются для построения генераторных датчиков.

Табл. 2.1

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
1. Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
2. Поток оптического излучения	Пироэлектрический эффект Внешний фотоэффект Внутренний фотоэффект в полупроводнике с р-п-переходом	Заряд Ток Напряжение
3. Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
4. Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
5. Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

*Термоэлектрический эффект* – датчик-термопара содержит два проводника различной химической природы, их спаи, находящиеся при различных температурах, являются местом возникновения термоЭДС (рис. 2.1), которая пропорциональна разности температур.

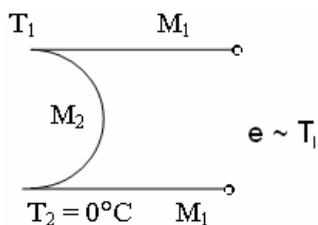


Рис. 2.1.

*Пироэлектрический эффект* – кристаллы (пироэлектрики), например, триглицинсульфата, испытывают спонтанную поляризацию и на обкладках образуются заряды, пропорциональные температуре. Поток излучения приводит к росту температуры кристалла и, следовательно, напряжения на обкладках конденсатора (рис. 2.2).

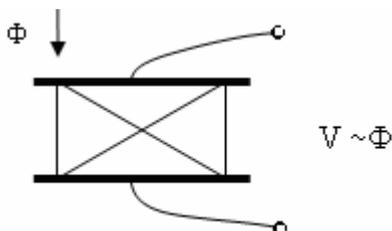


Рис. 2.2.

*Внешний фотоэффект* заключается в том, что под действием светового потока электроны покидают фотокатод и образуют ток, пропорциональный освещенности.

*Внутренний фотоэффект* в полупроводнике заключается в том, что под действием светового потока электроны и дырки, освобожденные в окрестностях освещенного р-п - перехода, перемещаясь под действием электрического поля, вызывают изменение напряжения на границах полупроводника.

*Пьезоэлектрический эффект* заключается в том, что при деформации пьезоэлектрика появляются заряды на противоположащих поверхностях (рис. 2.3).

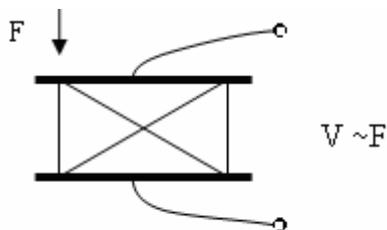


Рис. 2.3.

*Явление электромагнитной индукции* заключается в том, что при изменении магнитного потока через замкнутый контур, в нем наводится ЭДС  $e = -c \, d\Phi/dt$  (рис. 2.4), пропорциональная скорости вращения  $\omega$ .



Рис. 2.4.

*Эффект Холла* заключается в том, что при пропускании тока через образец полупроводника, находящийся в магнитном поле, в перпендикулярном направлении возникает ЭДС  $U = kIB\sin\theta$  (рис. 2.5).

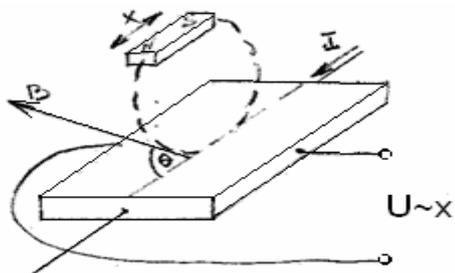


Рис. 2.5.

При перемещении постоянного магнита изменяется индукция  $B$  и, следовательно, выходное напряжение датчика. Таким образом можно измерять перемещение.

## 2.2. Параметрические датчики

*Параметрические датчики* (пассивные в зарубежной литературе) изменяют некоторые параметры выходного импеданса под воздействием измеряемой величины. В табл. 2.2 указан ряд физических эффектов, используемых для построения параметрических датчиков.

Таблица 2.2

Измеряемая величина	Изменяющийся параметр	Материалы
Температура	Сопротивление	Металлы, полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Перемещение	Магнитная проницаемость, сопротивление	Ферромагнитные сплавы, магниторезистивные металлы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

Импеданс параметрического датчика и его изменения можно измерить не иначе, как включая датчик в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала.

Наиболее часто используются следующие измерительные схемы: потенциметрическая схема, содержащая источник напряжения и датчик-потенциометр (рис. 2.6); мостовая схема, разбаланс которой характеризует изменение импеданса датчика (рис. 2.7); колебательный контур, включающий в себя импеданс датчика, изменение индуктивности  $L$  или емкости  $C$  датчика приводит к изменению резонансной частоты контура; операционный усилитель, в котором импеданс датчика является одним из элементов, определяющих коэффициент усиления.

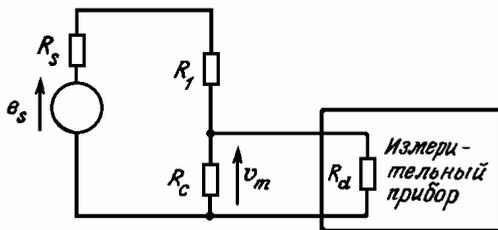


Рис. 2.6.

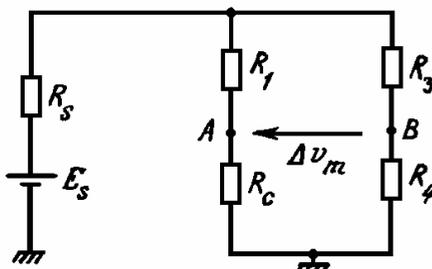


Рис. 2.7.

При измерениях некоторых физических величин не всегда удается преобразовать их сразу в электрическую величину. В этом случае измеряемую величину преобразуют в промежуточную неэлектрическую величину, которую преобразуют в электрическую. Совокупность двух измерительных преобразователей образует *комбинированный датчик* (рис. 2.8).



Рис 2.8

Давление, например, можно измерить с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину датчиком, реагирующим на механическое смещение.

### 2.3. Источники погрешностей параметрических преобразователей

При включении параметрического преобразователя в измерительную цепь к основному (измеряемому) параметру датчика подключаются соответствующие параметры цепи, которые не всегда поддаются учету и к тому же могут изменяться во времени или в зависимости от внешних условий. Это приводит к погрешности измерений. Рассмотрим более подробно источники этих погрешностей для резистивных, емкостных и индуктивных преобразователей.

#### 2.3.1. Резистивные преобразователи

Сопротивление постоянному току одноэлементного резистивного преобразователя равно:  $R_o = \rho l / s$ , где  $l$  – длина;  $s$  –

площадь поперечного сечения;  $\rho$  – удельное сопротивление материала.

Пленочные резисторы, толщина которых определяется технологией, характеризуются сопротивлением  $R_n$  площадки, имеющей равные длину и ширину. Тогда сопротивление резистора длиной  $l$  и шириной  $b$  будет равно  $R_o = R_n l / b$ .

При включении в измерительную цепь на резисторе выделяется мощность  $P = I^2 R$  или  $P = U^2 / R$ . Значение этой мощности ограничивается допустимым перегревом  $P_{дон}$ . Поэтому допустимый ток  $I \leq \sqrt{P_{дон} / R_{макс}}$  или напряжение  $U \leq \sqrt{P_{дон} R_{мин}}$ , где  $R_{макс}$  и  $R_{мин}$  – границы изменения сопротивления преобразователя при работе.

*Влияние паразитных сопротивлений.* При включении резистивного преобразователя в цепь последовательно с его сопротивлением  $R_o$  оказывается сопротивление линии  $R_l$ , состоящее из сопротивления проводов  $2R_{np}$  и контактов  $2R_k$  (рис. 2.9 а), т. е.  $R_l = 2R_{np} + 2R_k$ .

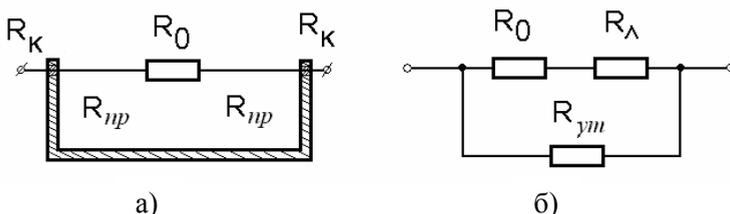


Рис. 2.9.

Параллельно включено сопротивление утечки  $R_{ум}$  на корпус или на землю (рис. 2.9 б). Таким образом, эквивалентное сопротивление датчика будет равно:

$R = (R_o + R_l) R_{ум} / (R_o + R_l + R_{ум})$ . Разность  $\Delta R = R - R_o = (R_l R_{ум} - R_o R_l - R_o^2) / (R_o + R_l + R_{ум}) \approx R_l - R_o^2 / R_{ум}$ . Относительная погрешность  $\gamma_R = \Delta R / R_o = R_l / R_o - R_o / R_{ум}$ . Очевидно, что при малых  $R_o$  погрешность определяется  $R_l$ , а при больших –  $R_{ум}$ . Причем при  $R_o \leq \sqrt{R_l R_{ум}}$  погрешность  $\gamma_R > 0$ , а при  $R_o < \sqrt{R_l R_{ум}}$  погрешность  $\gamma_R < 0$ . Для уменьшения влияния  $R_l$  применяют схему четырехзажимного включения (рис. 2.10).

На рис. 2.10 1, 2 – токовые зажимы; 3, 4 – потенциальные зажимы;  $I_n \ll I_T$ . Ток  $I_n$ , протекающий через вольтметр, много меньше тока  $I_T$ , протекающего через датчик, поэтому во столько же раз падение напряжения на проводах милливольтметра меньше, чем на  $R_d$ .

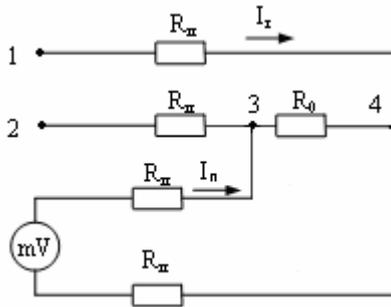


Рис. 2.10.

Уменьшение влияния сопротивления утечки  $R_{yT}$  достигается с помощью эквипотенциальной защиты (рис. 2.11).

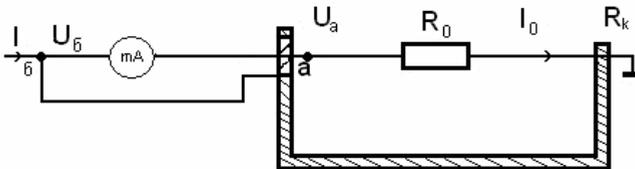


Рис. 2.11.

При отсутствии экрана ток через миллиамперметр больше  $I_0$  на величину тока утечки  $\Delta I = I_{ym} = U_a / R_{из}$ , где  $U_a = I_0 R_0$ ,  $R_{из}$  – сопротивление изоляции. Относительная погрешность измерения тока  $\gamma_I = R_0 / R_{из} = I_{ym} / I_0$ . При наличии экрана  $\Delta I' = (U_б - U_a) / R'_{из} = (I_0 + I'_{ym}) R_0 / R'_{из}$ , или  $I'_{ym} = I_0 R_0 / (R_{из} - R_0) = I_0 R_0 / R_{из}$ , так как  $R_0 \ll R_{из}$ . Считая  $R'_{из} = R_{из}$ , видим, что погрешность уменьшилась в  $K = \Delta I / \Delta I' \approx R_0 / R_0$  раз.

*Влияние индуктивной и емкостной составляющей резистивных датчиков.* При включении резистивного датчика в цепь переменного тока нужно учитывать его емкость и индуктивность. Емкость  $C$  может быть образована межвитковыми емкостями и емкостью между резистором и близлежащими элементами. Индуктивность прямолинейного участка провода радиусом  $r_0$  и длиной  $l$  определяется формулой:  $L = (\mu_0 l [\ln(2l/r_0) - 1])/2\pi$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха. Индуктивность одновиткового контура радиуса  $r$  равна:  $L = \mu_0 r [\ln(8r/r_0) - r]$ . Индуктивность велика у многovitковых проволочных резисторов. Для ее уменьшения применяют *бифилярную* обмотку (рис. 2.12, а, б). На рис. 2.12, а стрелками показано направление тока, протекающего по обмотке. На рис. 2.12, б показана эквивалентная схема, учитывающая емкостную составляющую.

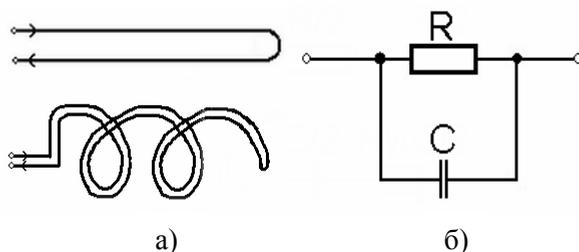
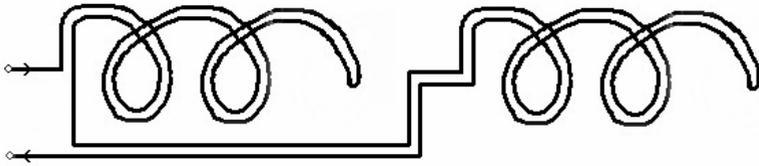


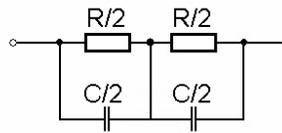
Рис. 2.12.

При такой обмотке можно пренебречь индуктивностью, но емкость резко возрастет. Компромиссом является бифилярная секционная обмотка (рис. 2.13 а). На рис. 2.13 б показана эквивалентная схема, из которой видно, что паразитные емкости оказываются включенными последовательно и их влияние уменьшается. Их можно учесть некоторым значением эквивалентной емкости  $C_{\text{эkv}}$ .

Сопротивление переменному току можно характеризовать постоянной времени  $\tau$ , равной  $C_{\text{эkv}}R$ . С этой точки зрения лучшие преобразователи характеризуются значением  $\tau=10^{-6}\div 10^{-7}$ с. Для  $\tau=10^{-6}$ с изменение модуля сопротивления на 0,01% происходит на частоте 10 кГц.



а)



б)

Рис. 2.13.

*Тепловые шумы.* Средняя мощность шумов определяется формулой Найквиста:  $P_{ш} = 4kT\Delta f$ , где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  – абсолютная температура,  $\Delta f$  – полоса частот, к которой относится мощность. Действующее шумовое напряжение:  $U_{ш}^2 = RP_{ш} = 4kTR\Delta f$ , т.е. зависит от величины сопротивления.

*ТермоЭДС.* Измерительный прибор, провода и вход измерительной цепи образуют контур, в котором присутствуют разнородные металлы. На рис. 2.14 показан резистор  $R_0$  из манганина (материал А), медные провода (материал В) и измерительный прибор, внутри которого использовано сопротивление  $R$  из константана (материал С). Между разнородными металлами при наличии температурного градиента возникает термоЭДС.

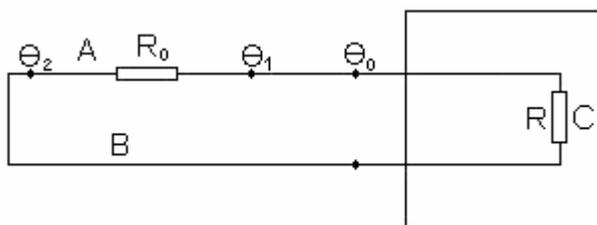


Рис. 2.14.

Контакты резистивного преобразователя  $R_0$  находятся при температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , остальная часть цепи при температуре  $\theta_0$ . Если  $\theta_2 \neq \theta_1$ , т. е. на резисторе имеется градиент температур, то возникает ЭДС, которая является функцией разности температур  $(\theta_2 - \theta_1)$ .

*Электрохимическая ЭДС.* На контактах измерительной цепи влага растворяет окислы и образует электролит. Возникает ЭДС, значение которой зависит от количества и природы электролита и материала контактов. Величину ЭДС можно значительно снизить выбором материала контактов, особенно их золочением, и свести к нулю вакуумированием контактов.

*Влияние магнитных полей.* Любая измерительная цепь образует контур. При наличии переменного магнитного поля  $B = B_m \sin \omega t$  в контуре индуцируется ЭДС  $e_{\text{инд}} = -\omega B_m S \cos \omega t$ , где  $S$  – площадь контура. Чтобы уменьшить ЭДС, нужно свести к минимуму площадь контура и по возможности экранировать участки, находящиеся в магнитном поле. Для этого используется витая пара проводов (рис. 2.15).

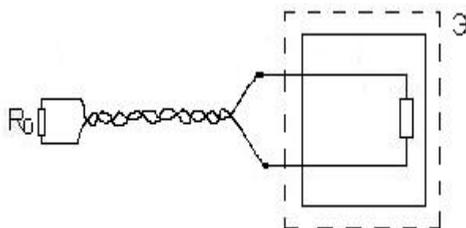


Рис. 2.15.

ЭДС  $e_{\text{инд}}$  можно скомпенсировать, включив навстречу ей ЭДС  $e_k$ , наводимую в специально сделанной компенсационной петле (рис. 2.16). В этом случае все провода и элементы нужно жестко закреплять.

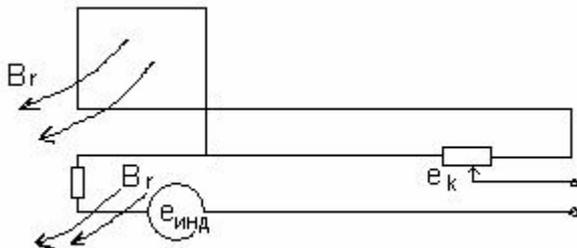


Рис. 2.16.

*Влияние электрических полей.* Электрическое поле от постороннего источника энергии наводит токи в проводах измерительного контура (рис. 2.17.), состоящего из датчика  $R_0$  и источника питания  $E$  с внутренним сопротивлением  $Z_{\text{вн}}$ .

Эти токи через сопротивления связи  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  замыкаются на земле. Паразитные сопротивления, как правило, много больше сопротивлений измерительного контура, поэтому источник помехи можно рассматривать как источник тока  $i_3$ .

Тогда наведенная в контуре ЭДС  $e_3$ , равна

$$e_3 = i_3 \frac{Z_{\text{вн}} R_0}{Z_{\text{вн}} + R_0}.$$

Ток  $i_3$  будет тем больше, чем больше длина линии, соединяющей датчик и измерительную цепь, и чем больше частота источника помехи, так как сопротивление связи определяется паразитными емкостями. ЭДС  $e_3$  будет тем больше, чем больше сопротивление параллельного соединения  $Z_{\text{вн}}$  и  $R_0$ , поэтому наведенная ЭДС проявляется в цепях с высокоомными преобразователями. Для уменьшения наводок все соединительные провода, сам преобразователь и измерительная цепь защищаются электростатическим экраном (рис. 2.18).

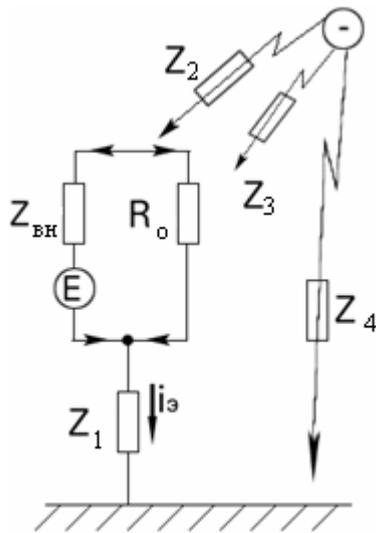


Рис. 2.17.

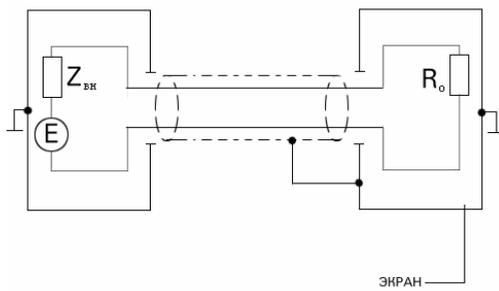


Рис. 2.18.

Эквивалентная схема резистивного преобразователя с учетом рассмотренных факторов представлена на рис. 2.19.

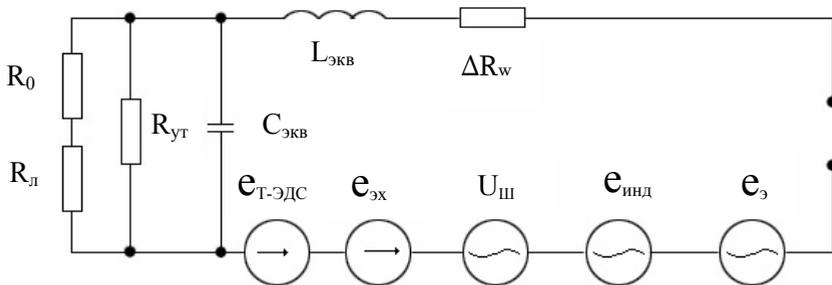


Рис. 2.19.

На рисунке:  $R_0$  – сопротивление измерительного преобразователя (датчика);  $R_л$  – сопротивление линии связи;  $R_{ут}$  – сопротивление утечки (изоляции);  $C_{экв}$  и  $L_{экв}$  – эквивалентные емкость и индуктивность датчика;  $e_{Т-ЭДС}$  – термо-эдс из-за наличия разнородных металлов в измерительной цепи;  $e_{эx}$  – электрохимическая ЭДС на контактах;  $U_{ш}$  – действующее шумовое напряжение;  $e_{инд}$  – ЭДС, индуцируемая в измерительной цепи при наличии магнитных полей;  $e_э$  – ЭДС из-за наводок от переменных электрических полей.  $\Delta R_w$  учитывает изменение сопротивления из-за скин-эффекта.

*Чувствительность резистивных преобразователей и влияние внешних факторов.* В общем случае на резистивный преобразователь влияют различные по физической природе величины: электрические ( $x_э$ ), магнитные ( $x_м$ ), механические ( $x_{мх}$ ), тепловые ( $x_т$ ), световые ( $x_с$ ) и т. д. Полное изменение сопротивления составляет

$$dR = (\partial R / \partial x_э) \cdot d x_э + (\partial R / \partial x_м) \cdot d x_м + \dots + (\partial R / \partial x_с) \cdot d x_с.$$

Частные производные являются чувствительностями к различным входным величинам. Зависимость между  $R$  и воздействующим фактором используется для построения соответствующего преобразователя, в то же время зависимость от других факторов приводит к появлению ошибки. Поэтому при построении преобразователя стремятся к тому, чтобы изменение сопротивления происходило под действием лишь одной измеряемой величины. Для этого влияние остальных величин сводят к минимуму конструктивным путем или применением компенсирующих устройств.

### 2.3.2. Емкостные датчики

Простейший емкостной датчик содержит два электрода площадью  $S$ , параллельно расположенных на расстоянии  $\delta$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  (рис. 2.20).

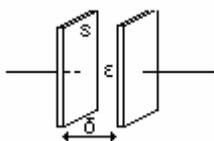


Рис. 2.20.

$$\text{Емкость датчика } C = \frac{\epsilon S}{\delta}.$$

Для емкостного датчика входными величинами могут быть механическое перемещение, изменяющее  $\delta$  или  $S$ , или температура и состав диэлектрика, изменяющие  $\epsilon$ . Такие датчики работают на переменном токе несущей частоты, которая должна быть много больше максимальной частоты изменения емкости под действием измеряемой величины.

В качестве емкостных преобразователей используются также запертые р-п-переходы: р- и п-области играют роль пластин, разделенных обедненным слоем, ширина которого  $\delta$ . Под действием приложенного напряжения изменяется  $\delta$  и, следовательно, емкость р-п-перехода.

Проанализируем источники погрешностей в емкостных датчиках. Для этого рассмотрим конструкцию на рис. 2.21 а.

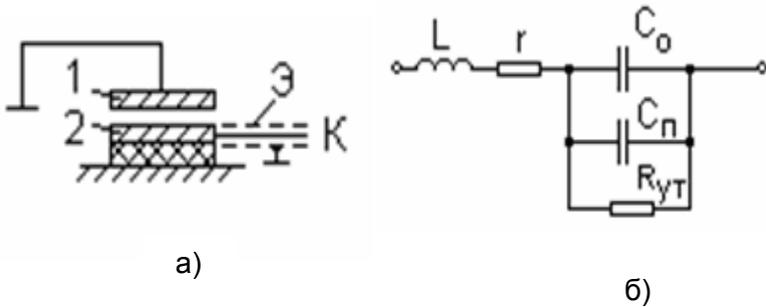


Рис. 2.21.

Эквивалентная схема (рис. 2.21 б) учитывает емкость  $C_o$  между пластинами 1 и 2 конденсатора, сопротивление утечки  $R_{ут}$  изоляции между ними, сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$  кабеля, а также паразитную емкость  $C_{п}$ , включающую емкость между пластинами и заземленными деталями и емкость кабеля.

В зависимости от обстоятельств учитываются те или иные элементы. При работе на *низкой* частоте сопротивление конденсатора ( $C_o$ ) велико и поэтому  $L$  и  $r$  кабеля можно не учитывать. При работе на *высоких* частотах сопротивление конденсатора падает и нужно учитывать  $L$  и  $r$  кабеля, но можно пренебречь  $R_{ут}$ . В этом случае эквивалентную схему можно представить так, как показано на рис. 2.22.

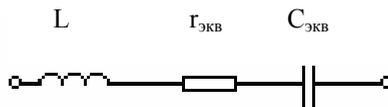


Рис. 2.22.

На рисунке  $r_{эКВ} = r$ ,  $C_{эКВ} = C_o + C_{п}$ . Сопротивление  $R_{ут}$  при

необходимости учитывается добавкой в сопротивлении  $r_{\text{ЭКВ}}$  :

$$r_{\text{ЭКВ}} = r + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R_{\text{ут}}}$$

Действие  $L$  сказывается на частотах выше 10 МГц.

В эквивалентной схеме электростатического преобразователя с диэлектриком нужно учитывать потери в нем. Из-за этих потерь сдвиг фаз между напряжением  $U$  и током  $I$  меньше  $\pi/2$  на угол потерь  $\delta$ . Можно использовать последовательные и параллельные эквивалентные схемы (рис. 2.23).



Рис. 2.23.

На рисунке:

$$r_{\text{ЭКВ}} = \frac{\text{tg}(\delta)}{\omega \cdot C_{1\text{ЭКВ}}} ; \quad R_{2\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{2\text{ЭКВ}} \cdot \text{tg}(\delta)}$$

При этом  $C_{2\text{ЭКВ}} = C_{1\text{ЭКВ}}(1 + \text{tg}(\delta))$ , но так как  $\text{tg}(\delta) \ll 1$ , то  $C_{2\text{ЭКВ}} \approx C_{1\text{ЭКВ}} \approx C_{\text{ЭКВ}}$ . Для воздушных конденсаторов  $\text{tg}(\delta)$  не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$ . Для диэлектриков он значительно больше и зависит от напряжения  $U$ , частоты  $\omega$ , температуры  $t^\circ$  и влажности. В частности, зависимость от влажности очень существенная, что позволяет строить измерители влажности зерна и других сыпучих материалов.

Диэлектрики после поляризации сохраняют заряд (явление абсорбции) в течение  $0,1 \div 2$  с, что приводит к остаточным напряжениям, достигающим нескольких процентов от приложенного напряжения. Этот фактор учитывается цепочкой  $R_a C_a$ , включенной параллельно  $C_0$ .

При работе электростатических преобразователей на постоянном токе нужно учитывать контактную разность потенциалов  $e_k$ , которая существует даже между контактами из одного материала и может достигать 1В. С помощью специальных мер ее удастся снизить до 10÷20 мВ. Полная эквивалентная схема с учетом перечисленных факторов представлена на рис. 2.24 (обозначения те же, что и на рис. 2.21).

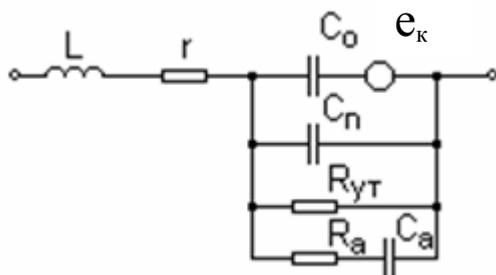


Рис. 2.24.

Допустимое напряжение на конденсаторе определяется значением напряженности электрического поля, при которой наступает пробой воздушного промежутка. Для воздуха при нормальном давлении и зазорах 0,1÷10 мм оно равно 2÷3 кВ/мм. При зазорах < 0,1 мм можно не снижать напряжения, т. к. при  $U < 350$  В воздушный промежуток вообще не пробивается.

В ряде случаев  $U_{пит}$  ограничивается допустимыми силами электростатического притяжения между пластинами. Так при площади пластин  $S = 5 \text{ см}^2$ ,  $\delta = 0,1$  и  $U = 50$  В значение электростатической силы  $f_{эс} = \epsilon / (2\delta)^2 = 6 \cdot 10^{-4}$  Н.

Для уменьшения этой силы (если это важно) используют дифференциальную схему, в которой силы частично компенсируются (рис. 2.25).

*Зависимость от внешних условий.* Относительное изменение емкости  $C = \epsilon S / \delta$  равно  $\gamma_c = \gamma_\epsilon + \gamma_s - \gamma_\delta$ .

Площадь  $S$  определяется линейными размерами (10÷100 мм) и их изменение на 0,1÷1 мкм несущественно.

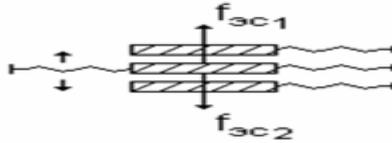


Рис. 2.25.

Зазор  $\delta$  составляет  $10 \text{ мкм} \div 1 \text{ мм}$  и его изменения даже на  $0,1 \text{ мкм}$  могут вызвать существенную погрешность, поэтому необходимо продумывать вопросы крепления пластин и защиты их от выпадения осадков на них.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  воздуха весьма стабильна и мало меняется под действием внешних условий: при изменении температуры  $\Delta t^\circ = 10^\circ\text{C}$   $\gamma_\epsilon = 0,002\%$ , при изменении влажности от 30 до 40%  $\gamma_\epsilon = 0,01\%$ , при изменении давления на  $10^5 \text{ Н/м}^2$   $\gamma_\epsilon = 0,06\%$ .

Стабильными диэлектриками являются также плавный кварц ( $\gamma_\epsilon = 5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ) и стекло.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  ряда керамик, особенно сегнетокерамик, сильно зависит от напряженности электрического поля, температуры  $t^\circ$  и гидростатического давления. На их основе выпускаются *вариконды* – переменные конденсаторы с нелинейной зависимостью  $C$  от  $U$ . Но сегнетоэлектрики очень *нестабильны*.

### 2.3.3. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики (ИД) представляют собой один или несколько контуров, находящихся в магнитном поле, которое может быть создано как токами, протекающими по контурам, так и внешним источником.

Индуктивность  $L$  катушки, состоящей из  $w$  витков проволоки, зависит от магнитного сопротивления  $R_m$  магнитопровода:  $L = w^2/R_m$ .

Величина магнитного сопротивления  $R_m$  определяется геометрическими размерами магнитопровода и его магнитной проницаемостью  $\mu$ :

$$R_m = \frac{l}{S\mu},$$

где  $l$  – длина магнитопровода, а  $S$  – площадь его поперечного сечения.

Таким образом, индуктивность катушки будет равна:

$$L = \frac{w^2 S \mu}{l}.$$

Изменение любого параметра в выражении приводит к изменению индуктивности и используется при построении ИД.

При изменении положения сердечника изменяется  $L$ . Таким образом, входной величиной является перемещение, а выходной – индуктивность (рис. 2.26).

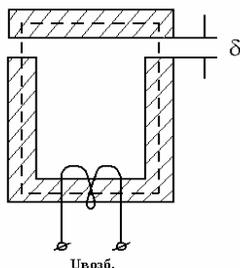


Рис. 2.26.

Изменение индуктивности происходит также при изменении магнитной проницаемости  $\mu$ , которая зависит от значения напряженности магнитного поля в материале. Соответственно  $L$  зависит как от тока, текущего через преобразователь и создающего собственное магнитное поле, так и от параметров внешнего магнитного поля.

Преобразователи, принцип действия которых основан на использовании зависимости  $L=f(B)$ , называются *магнито – модуляционными*.

При деформации ферромагнетиков также изменяется их магнитная проницаемость. Этот эффект называется *магнитоупругим* и используется для измерения *сил и давления* (см. рис. 2.27).

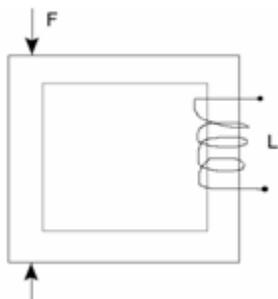


Рис. 2.27.

Эквивалентная схема одноконтурного индуктивного датчика представлена на рис. 2.28.

Основной магнитный поток пронизывает всю обмотку и сцепляется со всеми витками, а поток рассеяния замыкается, не пронизывая ряд витков. Полная индуктивность контура имеет две составляющие: основную  $L$  и рассеяния  $L_{рас}$ . При введении ферромагнитного сердечника доля потоков рассеяния уменьшается и отношение  $L/L_{рас}$  увеличивается. Наименьшую  $L_{рас}$  имеет обмотка, выполненная на тороидальном сердечнике.

При введении сердечника появляются *потери на перемагничивание* материала. Они учитываются сопротивлением  $R$ . Кроме того, нужно учитывать межвитковые емкости. До  $10^3 \div 10^4$  Гц они учитываются в виде сосредоточенной емкости  $C$ .

На эквивалентной схеме:  $R_0$  – сопротивление обмотки,  $L$  – основная индуктивность,  $L_{рас}$  – индуктивность рассеяния.  $\epsilon_{инд}$  может быть как информативной, так и помехой. Для уменьшения  $\epsilon_{инд}$ , которая является помехой, преобразователь экранируется от внешнего магнитного поля. Провода подводятся в виде скрученной пары. Преобразователь в магнитном поле должен быть защищен от механических помех (вибрации, акустические воздействия).

Для уменьшения ЭДС  $e_{\text{инд}}$  применяют симметричные магнитные цепи и симметричные обмотки. Например, равномерная обмотка на *тороидальном* сердечнике. Каждому витку найдется симметричный и ЭДС в них компенсируются.

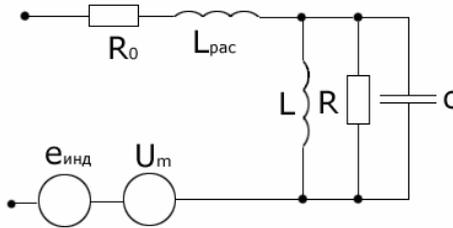


Рис. 2.28.

$U_m$  – напряжение шума, вызванное в области средних частот *эффектом Баркгаузена*, т. е. импульсами ЭДС, вызываемыми *скачкообразным* смещением доменных границ при перемагничивании ферромагнетика. Обычно  $U_m \ll e_{\text{инд}}$ , и его принимают в расчет только в очень чувствительных преобразователях.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры физических эффектов, используемых в генераторных датчиках.
2. Приведите примеры физических эффектов, используемых в параметрических датчиках.
3. Как получается выходной сигнал в параметрическом датчике?
4. Какие источники погрешностей вы знаете в резистивном преобразователе?
5. Какие источники погрешностей вы знаете в индуктивном преобразователе?
6. Какие источники погрешностей вы знаете в емкостном преобразователе?

7. Какой метод используется для уменьшения влияния сопротивления линии на погрешность измерений?

8. Какой метод используется для уменьшения влияния сопротивления утечки изоляции на погрешность измерений?

9. С какой целью используют бифилярную намотку резистивного датчика?

10. Какие методы используются для защиты датчиков от влияния магнитных полей?

11. Какие методы используются для защиты датчиков от влияния электрических полей?

12. Приведите эквивалентную схему резистивного датчика с учетом различных факторов, влияющих на погрешность измерения.

13. Приведите эквивалентную схему емкостного датчика с учетом различных факторов, влияющих на погрешность измерения.

14. Приведите эквивалентную схему индуктивного датчика с учетом различных факторов, влияющих на погрешность измерения.

### 3. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 3.1. Шкалы температур

Из всех физических величин наиболее часто измеряемой является температура. Температура в термодинамике наряду с объемом и давлением является одной из трех основных величин, характеризующих состояние вещества.

Известно, что зависимость между средней кинетической энергией поступательного движения молекул и количеством переданного телу тепла для простейших веществ (идеальных газов)

описывается выражением  $E = \frac{3}{2}k\Theta$ , где  $k$  – постоянная Больцмана;

$\Theta$  – абсолютная температура.

Величину, характеризующую внутреннюю энергию тела, обусловленную поступательным движением молекул, принято называть температурой.

*Абсолютные или термодинамические шкалы.* Чтобы определить числовые значения температуры  $T$ , необходимо выбрать для нее единицу измерения. Для этого достаточно произвольно установить значение температуры, соответствующей четко определенному и воспроизводимому явлению.

*Шкала Кельвина (1852 г.).* Единица измерения «кельвин» (К) определяется из условия, что температура воды в тройной точке (температура равновесия воды, льда и пара) равна 273,16 К (рис. 3.1).

*Шкала Рэнкина.* Градус Рэнкина ( $^{\circ}\text{R}$ ) равен 5/9 кельвина. Тогда температура в тройной точке воды равна 491,69  $^{\circ}\text{R}$ .

*Производные шкалы* получаются путем простого смещения нуля термодинамической шкалы. Они не являются абсолютными, но имеют ту же единицу измерения, как у исходной шкалы.

*Шкала Цельсия (1742 г.)* получается из шкалы Кельвина, если за нуль принять температуру замерзания воды, при этом  $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ .

Температура в тройной точке воды равна  $+0,01^{\circ}\text{C}$ . Тогда  $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$ .

*Шкала Фаренгейта (1723 г.)* получается путем смещения нуля абсолютной шкалы Рэнкина, причем за нуль принята температура

смеси льда с солью и нашатырным спиртом.  $T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67$ . Температура тающего льда, т. е.  $0^{\circ}\text{C}$  соответствует  $32^{\circ}\text{F}$ , тогда  $T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32](5/9)$ . На рис. 3.1 приведены шкалы температур в диапазоне от абсолютного нуля до точки кипения воды.

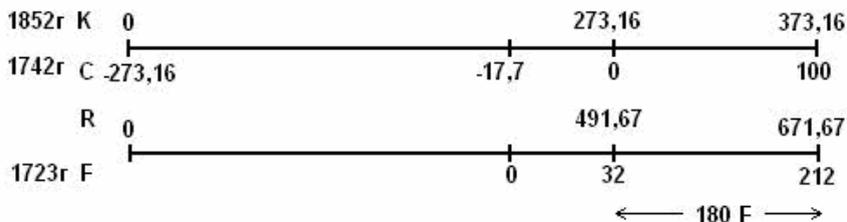


Рис. 3.1.

*Термоэлектрические эффекты* отражают преобразование энергии теплового движения в электрическую энергию движущихся зарядов.

*Эффект Пельтье.* В соединении двух разных проводников А и В с одинаковой температурой  $\Theta$  устанавливается разность потенциалов  $E_{AB}(\Theta)$ , называемая ЭДС Пельтье, которая зависит только от природы проводников и их температуры (рис. 3.2).

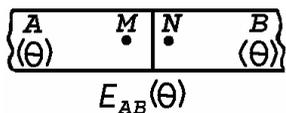


Рис. 3.2.

*Эффект Томпсона.* Между двумя точками М и N однородного проводника А с различными температурами возникает ЭДС  $E_A(\Theta_M, \Theta_N)$ , которая зависит только от природы проводника и температур  $\Theta_M$  и  $\Theta_N$  (рис. 3.3).

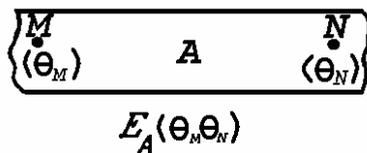


Рис. 3.3.

*Эффект Зеебека.* В цепи, состоящей из проводников А и В, спаи которых находятся при разных температурах  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , возникает ЭДС Зеебека, которая является результатом эффектов Пельтье и Томпсона в данной цепи (рис. 3.4). Если в качестве  $\Theta_1$  взять например  $0^\circ\text{C}$ , то ЭДС данной пары проводников будет зависеть только от  $\Theta_2$ .

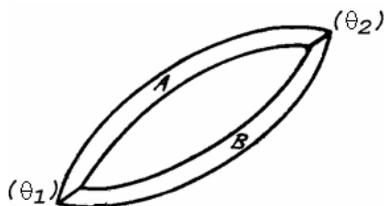


Рис. 3.4.

*Закон последовательности металлов.* ЭДС пары металлов АС можно определить, если известны ЭДС для пар А и С с третьим проводником В. Тогда  $E_{AC}(\Theta_1, \Theta_2) = E_{AB}(\Theta_1, \Theta_2) - E_{CB}(\Theta_1, \Theta_2)$ .

*Закон последовательности температур.* Если температура  $\Theta_1$  холодного спаи принимает новое значение  $\Theta'_1$ , то ЭДС Зеебека термопары АВ изменится от значения  $E_{AB}(\Theta_1, \Theta_2)$  до значения  $E_{AB}(\Theta'_1, \Theta_2) = E_{AB}(\Theta_1, \Theta_2) - E_{AB}(\Theta'_1, \Theta_1)$ , т. е. нужно вводить коррекцию на величину  $E_{AB}(\Theta'_1, \Theta_1)$ .

*Закон промежуточных металлов.* Когда в цепь термопары АВ включают цепь из другого металла С, то ЭДС не изменяется, если температура  $\Theta_0$  на ее концах М и М' одинакова (рис. 3.5).

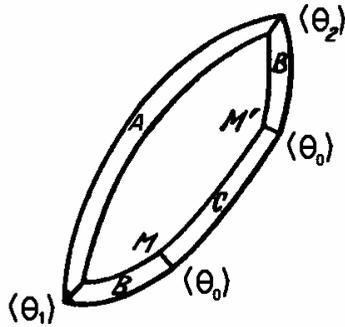


Рис. 3.5.

### 3.2. Термоэлектрические преобразователи

Явление термоэлектричества открыто в 1823 г. Зеебеком: если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами при разных температурах  $\theta_0$  и  $\theta_1$ , то в цепи потечет ток под действием термоЭДС (рис. 3.6, а). Подобная цепь называется *термопарой*, проводники – *термоэлектродами*, а места соединения – *спаями*. Значение термоЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры вдоль проводников.

Термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников.

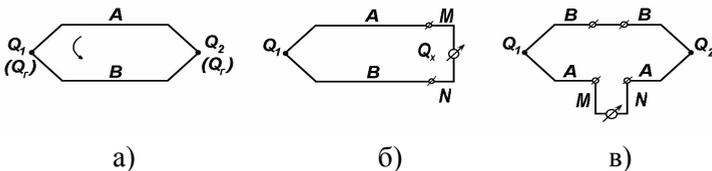


Рис. 3.6.

Если места соединения находятся при одной температуре, то паразитной термоЭДС не возникает (рис. 3.6 б, в). В обоих случаях термоЭДС равна  $E_{AB}(\Theta_1, \Theta_2)$ .

В 1934 г. Жан Пельтье установил, что при пропускании тока теплота выделяется в одном спае и поглощается в другом в зависимости от направления тока через спай. КПД термоэлектрического генератора (холодильника) невелик и составляет единицы %.

В измерительной технике термопара широко используется для измерения температур. Полупроводниковые термоэлементы используются для обратного преобразования (электрический ток в тепловой поток).

Материалы для термопар имеют различные величины термоЭДС, а в широком диапазоне температур зависимость  $E = f(\Theta)$  нелинейна. В табл. приведены значения термоЭДС для различных материалов в паре с платиной при  $\Theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\Theta_1 = 100^\circ\text{C}$ .

Таблица 3.1

Кремний	+ 44,8 мВ	Палладий	-0.57 мВ
Сурьма	+4.7 мВ	Никель	-1.5 мВ
Хромель	+2.4 мВ	Алюмель	-1.7 мВ
Нихром	+ 2.2 мВ	Платинородий (60% Au <sup>+</sup> , 30%Pd <sup>+</sup> , 10%Pt)	-2.31 мВ
Железо	+ 1.8 мВ	Константан	-3.4 мВ
Медь	+0.76 мВ	Копель	-4.5 мВ
Алюминий	+0.4 мВ	Пирит	-12.1 мВ
		Молибденит	-69÷-104 мВ

При конструировании термопар стремятся сочетать термоэлектроды с различной полярностью ЭДС. В табл. 3.2 приведены некоторые промышленные термопары.

Таблица 3.2

Материал	Обозначение	Пределы измерений в °С
Медь – копель		-200 ÷ +100
Медь – медно-никелевый		-200 ÷ +400
Железо – медно-никелевый		-200 ÷ +700
Хромель – копель	ТХК	-50 ÷ +600
Хромель – медно-никелевый		-100 ÷ +700
Хромель – алюмель	ТХА	-200 ÷ +1000
Платинородий – платина	ТПП	1 кл. 0 ÷ +1200 2 кл. 0 ÷ +1300
Платинородий (30%) – платинородий (6%)	ТПР	+300 ÷ +1600
Вольфрамрений (5%) – вольфрамрений (20%)	ТВР	0 ÷ +2200

Для этих типов термопар имеются градуировочные таблицы  $E = f(\Theta_1)$  при  $\Theta_0 = 0$  °С.

*Удлинительные термоэлектроды.* Свободные концы термопары нужно держать при постоянной температуре, однако длинными их сделать не всегда удастся. Соединительные провода  $A_1$  и  $B_1$ , идущие от зажимов до сосуда с постоянной температурой, называют удлинительными или компенсационными термоэлектродами (рис. 3.7). Обозначения на рисунке: 1 – провода к измерительному спаю, 2 – вата, 3 – к измерительному прибору, 4 – смесь воды со льдом, 5 – ртуть.

Для соединения с измерительным прибором можно использовать обычные провода. При этом нужно выполнить два условия: места подключения термоэлектродов к термопаре должны иметь одинаковую температуру ( $\Theta_2$ ); удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны основной термопаре в диапазоне температур от 0 °С до  $\Theta_2$ .

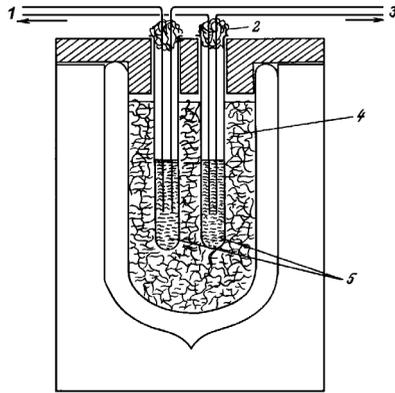


Рис. 3.7.

Конструктивно термопары выполняются в виде трех модификаций: с изолированным (от корпуса) спаем (рис. 3.8, а), с неизолрированным спаем (рис. 3.8, б), с открытым спаем (рис. 3.8, в). Назначение корпуса – защита термоэлектродов от механических и физико-химических воздействий среды. Вид конструктивного оформления влияет на динамические характеристики. Наиболее быстродействующей является

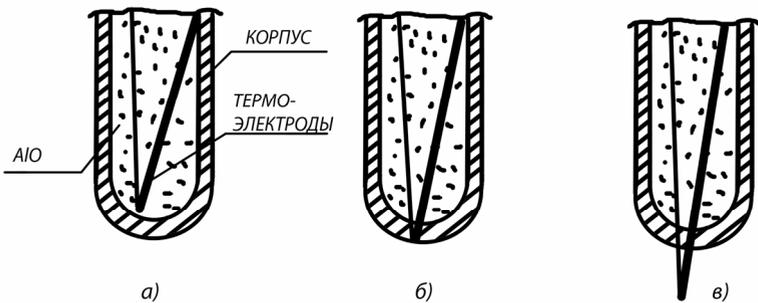


Рис. 3.8.

конструкция с открытым спаем.

Существует термоэлектрический кабель, состоящий из металлической оболочки (например, нержавеющей стали) и термоэлектродов того или иного типа. Внутреннее пространство заполнено порошком  $Al_2O_3$  (рис. 3.9). На основе таких кабелей можно реализовать любую конструкцию термопары.

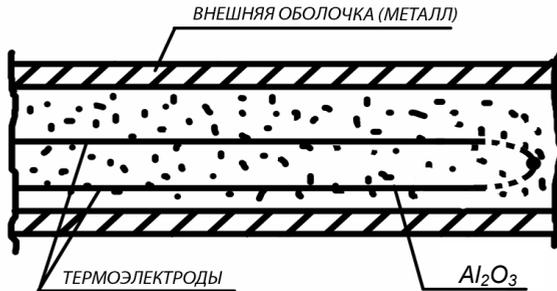


Рис. 3.9.

При внешнем диаметре кабеля  $1,5 \div 2,0$  мм термопара с неизолированным спаем имеет постоянную времени нагрева  $\tau = 0,05$  с, а с изолированным –  $0,2$  с.

*Погрешность из-за изменения температуры свободных концов.* Термопара градуируется при  $\theta_0 = 0$ , поэтому при отклонении  $\theta_0$  от нуля возникает погрешность. Из-за нелинейности зависимости  $E = f(\theta)$  поправка не будет равна  $\theta_0$ .

Для определения поправки  $\Delta\theta = f(\theta_0)$  по градуировочной кривой (таблице) находится  $\Delta E = f(\theta_0)$ , вычисляется  $E = E_{изм.} + \Delta E(\theta_0)$  и по нему определяется  $\theta$ . При этом  $\Delta\theta \neq \theta_0$  (рис. 3.10).

Термостатирование холодного спая технически неудобно. Существует схемотехнический способ (рис. 3.11) компенсации температуры холодного спая. Термосопротивление  $R_0$  имеет температуру холодного спая, при изменении которой изменяется компенсирующее напряжение  $U_k$ . Сопротивление моста и напряжение  $U$  подобраны таким образом, что закон изменения напряжения  $U_k$  от температуры, окружающей холодные спаи термопары, автоматически повторяет изменения ЭДС холодных спаев и компенсирует ее.

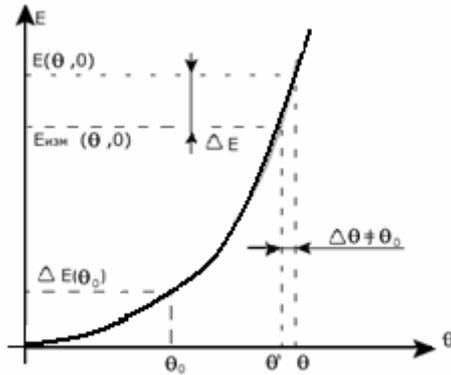


Рис. 3.10.

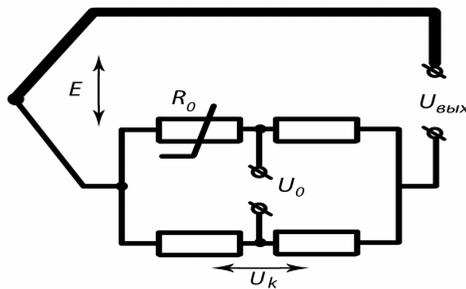


Рис. 3.11.

Когда в измерительной системе необходимо соединить много одинаковых термопар, рассмотренный метод может быть неприемлем. Кроме того, компенсационные (удлинительные) провода могут быть достаточно дороги. Тогда каждая термопара соединяется с измерительным прибором медными проводами, а температура холодного спая измеряется отдельной термопарой, образуемой удлинительными проводами (рис. 3.12).

На рис. 3.12:  $\theta_{из}$  – измеряемая температура;  $\theta_2$  – температура блока холодных спаев;  $\theta_1$  – температура окружающей среды.

ЭДС термопары при температуре холодного спая  $\theta_0=0^\circ\text{C}$  запишется так:

$$E(\Theta_{ui}, \Theta_0) = E(\Theta_{ui}, \Theta_2) + E(\Theta_2, \Theta_1) + E(\Theta_1, \Theta_0),$$

где:  $E(\Theta_{ui}, \Theta_2)$  – ЭДС термопары на схеме;  $E(\Theta_2, \Theta_1)$  – ЭДС термопары  $A'B'$ , идентичной  $AB$  (из удлинительных проводов);  $E(\Theta_1, \Theta_0)$  – ЭДС, которую вырабатывает корректирующее устройство, например типа, показанного на рис. 3.11.

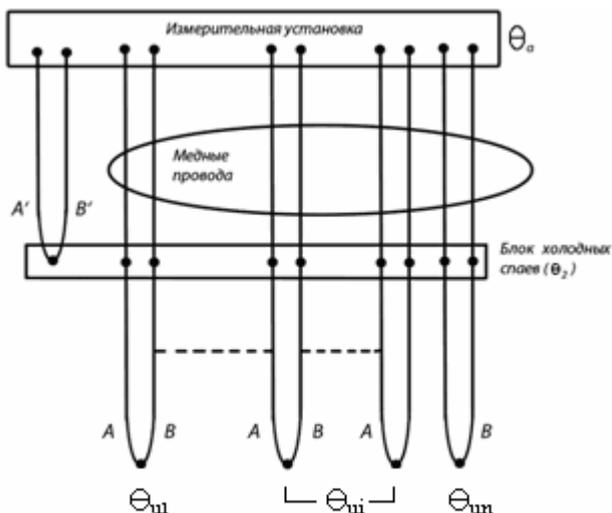


Рис. 3.12.

*Погрешность из-за изменения сопротивления термопары.* Для измерения ЭДС термопары используются как обычные милливольтметры, так и потенциометры с уравновешиванием. Если используются милливольтметры, то протекающий ток создает падение напряжения на сопротивлении термопары, к тому же это сопротивление изменяется. Так для термопары платина – платинородий, составленной из двух термоэлектродов диаметром  $d=0,35$  мм и длиной  $l=1$  м, сопротивление термопары составляет  $R_T=3,2$  Ом при  $20^\circ\text{C}$  и  $R_T=6,45$  Ом при  $1000^\circ\text{C}$ .

Для уменьшения погрешности милливольтметры градуируются в комплекте с термопарой с указанием сопротивления линии (5 Ом), которое подгоняется изменением сопротивления добавочной катушки при монтаже.

*Особенности измерения температуры с помощью термопар.*

1. Малый сигнал постоянного напряжения на зажимах термопары (от 70 до 1,5 мкВ/град.).
2. Изменение температуры холодных концов термоэлектродов.
3. Инеродность проводников, подключающих измерительный прибор к термопаре (лучше компенсационными проводами).
4. Нестабильность характеристик во времени.
5. Влияние внешних магнитных полей.
6. Влияние ионизирующего излучения.
7. Воздействие внешнего давления.
8. Степень воспроизводимости статических характеристик.
9. Влияние эффекта Томпсона.

Пункты 1 - 3 уже рассматривались.

Временная нестабильность возникает из-за изменения физико-химической однородности электродов (коррозия, деформация и т. п.). Хорошей временной стабильностью обладают химически чистые металлы.

Влияние магнитных полей связано с эффектом Нернста-Эттингхаузена: если электрический проводник находится в температурном поле  $\nabla \theta$  в присутствии поперечного магнитного поля  $\mathbf{H}$ , то в нем возникает электрическое поле  $\mathbf{E}_{эл} = Q \nabla \theta \times \mathbf{B}$ , где  $Q$  – коэффициент. Вывод: при наличии магнитных полей нужно выбирать неферромагнитные проводники, экранировать и по возможности ориентировать термопару так, чтобы  $\nabla \theta$  и  $\mathbf{H}$  были параллельны, тогда  $\nabla \theta \times \mathbf{H} = 0$ .

Плохо переносят нейтронное излучение термопары, материал которых изменяет под действием излучения свой химический состав. Лишь термопары ТХА (хромель – алюмель) практически нечувствительны к нейтронному излучению.

Гидростатическое давление существенно влияет на термоЭДС. Так, для ТХА при давлении 50 кбар ошибка достигает 4%. Нужно применять защитный кожух.

Лучше всего воспроизводятся характеристики термопар из химически чистых металлов. Допустимые отклонения нормируются ГОСТ. Чем точнее термопара, тем дороже (цена может отличаться на порядок).

ЭДС Томпсона возникает из-за химической неоднородности электродов. В начале эксплуатации величина ЭДС невелика. В процессе эксплуатации из-за изменения физико-химических свойств она может достигать заметной величины.

### 3.3. Металлические термометры сопротивления (терморезисторы)

Величина электрического сопротивления  $R$  обычно зависит от его температуры  $\theta$ . Для измерения температуры используются материалы с высокостабильным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), линейной зависимостью  $R = f(\theta)$ , хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям среды. Это платина, медь (дешево), вольфрам и никель.

Сопротивление платиновых терморезисторов в диапазоне температур  $0 \div 650^\circ\text{C}$  определяется выражением:  $R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2)$ ; где  $R_0$  сопротивление при  $0^\circ$ ;  $A = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;  $B = 5,78 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ . В диапазоне температур  $0 \div -200^\circ\text{C}$ :  $R_\theta = R_0[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)\theta^3]$ , где  $C = -4,48 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$ .

Высокоомные платиновые термосопротивления напыляются на фарфоровую пластину и имеют сопротивление  $200 \div 500 \text{ Ом}$ .

Медные сопротивления в диапазоне  $-50^\circ\text{C} \div 180^\circ\text{C}$  имеют линейную зависимость  $R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta)$ , где  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . При температуре выше  $200^\circ\text{C}$  медь окисляется.

Погрешности возникают из-за нестабильности во времени  $R_0$  и  $\alpha$  и перегрева из-за измерительного тока. Допустимый ток равен  $I = 2d^{1,5} \Delta\theta^{0,5}$ , где  $I$  – ток в амперах,  $d$  – диаметр проволоки в мм,  $\Delta\theta$  – допустимая ошибка за счет нагревания током.

*Конструкция термометров сопротивления.* Типичная конструкция терморезистивного датчика представлена на рис. 3.13.

Такая конструкция определяет невысокие динамические характеристики. Одним из методов уменьшения постоянной времени является увеличение теплового контакта.

Элементами конструкции являются: 1 – защитный кожух; 2 – подложка, на которую нанесен измерительный элемент 3. Для увеличения теплопроводности и механической прочности пространство между кожухом и чувствительным элементом

заполнено порошком 4 из  $Al_2O_3$ .

Диаметр платинового провода 30 мкм, сопротивление зависит от длины намотки.

Постоянные времени промышленных термосопротивлений находятся в диапазоне от единиц до десятков секунд.

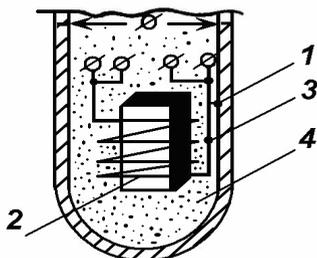


Рис. 3.13.

Промышленные термометры сопротивления делятся на два типа – платиновые (ТСП) и медные (ТСМ). Номинальные сопротивления ТСП от 1 до 500 Ом, ТСМ – от 10 до 100 Ом. Существует 5 классов точности  $\Delta R/R_0=0,05\%$  для I класса и 1% для V класса.

ТСП конструктивно оформлены в виде стальной трубки с глухим концом, в которой помещена платиновая спираль и керамический изолятор. Выводы загерметизированы.

В технике широко используются измерительные терморезисторы со стеклянной изоляцией, при этом роль защитной арматуры выполняет стекло, в которое запаивают без зазора терморезистор.

Для улучшения динамических характеристик до единиц миллисекунд в качестве термочувствительного элемента используют пленку из нужного материала, однако стремление к точности измерений приводит к малым сопротивлениям датчика и, следовательно, трудностям при измерениях. Кроме того, ТКС у пленки составляет 30÷80% от ТКС соответствующей проволоки.

*Поверхностные зонды.* Эти датчики предназначены для измерения температур на поверхностях (рис. 3.14). Они

наклеиваются на исследуемую поверхность и имеют постоянную времени 1 мс. Такой датчик чувствителен к деформациям образца, поэтому при больших деформациях и малых изменениях температуры дает большую ошибку.



Рис. 3.14.

### 3.4. Полупроводниковые термодатчики

*Полупроводниковые термодатчики* – это устройства, основой которых является материал с проводимостью большей, чем у диэлектриков, и меньшей, чем у металлов. Их можно подразделить на три группы:

- кристаллические, где используется зависимость сопротивления материала от температуры (германия или кремния);
- кристаллические германиевые и кремниевые p-n - переходы, где выходным, информативным параметром является один из параметров p-n - перехода (транзистора или диода);
- керамические, когда информативной является температурная зависимость сопротивления материала.

Из полупроводниковых термодатчиков наибольшее распространение получили керамические датчики, получившие название *термисторов* и *позисторов*. Они изготавливаются из смесей поликристаллических полупроводниковых оксидов металлов ( $MgO$ ,  $MgAl_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Co_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $ZnTiO_4$ ).

Порошки оксидов спекаются в форме под давлением и упрочняются посредством поверхностного обжига при температурах порядка  $1000^{\circ}C$  в контролируемой атмосфере.

Металлические выводы припаиваются к двум точкам предварительно металлизированной поверхности полупроводника.

Чувствительный элемент может иметь защитный корпус или капсулу. Термисторы выпускаются в виде дисков, цилиндров, колец, шариков. Высокие значения удельного сопротивления используемых материалов позволяют получить необходимое сопротивление при малых размерах (~1 мм). Вследствие этого термисторы позволяют проводить измерения практически в точке и имеют малую теплоемкость, т. е. инерционность.

Температурный диапазон применения термисторов – от нескольких градусов Кельвина до 300 градусов Цельсия. Номинальные значения термисторов лежат в диапазоне от 100 Ом до 300 Ом. Отклонение сопротивлений от номинальной величины составляет ± 10%, т. е. взаимозаменяемость посредственная.

Температурная характеристика термистора описывается выражением [8]:

$$R(\Theta) = R(\Theta_1) \cdot e^{B \cdot \left( \frac{1}{\Theta} - \frac{1}{\Theta_1} \right)},$$

где  $\Theta_1$  – некоторая фиксированная температура в Кельвинах;  $\Theta$  – текущее значение температуры;  $B$  – константа в Кельвинах;  $R(\Theta_1)$  – значение сопротивления термистора при температуре  $\Theta_1$ .

Температурный коэффициент термистора определяется, как:

$$\alpha = \frac{1}{R(\Theta)} \cdot \frac{dR(\Theta)}{d\Theta} = - \frac{B}{\Theta^2}.$$

Значение коэффициента  $B$  для  $\Theta = 25^\circ\text{C}$  в зависимости от материала находится в диапазоне от 2000 до 6000 К, а температурный коэффициент – в диапазоне от – 0,02 до – 0,06 1/К.

Из-за малых размеров сила тока, приводящая к перегреву на  $1^\circ\text{C}$ , в 15 раз меньше, чем для проволочных сопротивлений. На рис. 3.15 показаны для сравнения зависимости  $R(\Theta)$  для термистора и медного сопротивления.

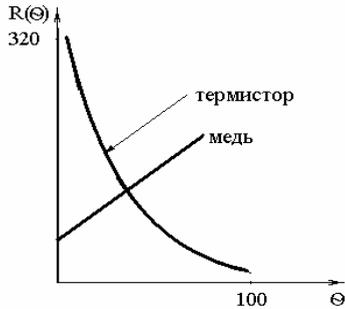


Рис. 3.15.

*Позисторы* имеют положительный температурный коэффициент. Материал позистора представляет собой композицию полупроводниковой и сегнетоэлектрической керамики. Его сопротивление определяется в основном переходным сопротивлением границ зерен, которое зависит от диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической добавки. Основой промышленных позисторов служит титанат бария с температурой фазового перехода  $-120^{\circ}\text{C}$ . Вид статической характеристики позистора показан на рис. 3.16.

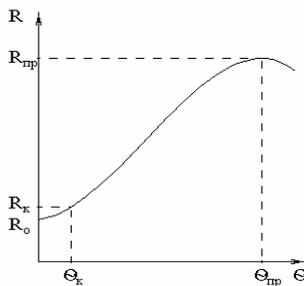


Рис. 3.16.

В сегнетоэлектрическом состоянии (ниже точки Кюри) сопротивление позистора изменяется незначительно (от  $R_0$  до  $R_k$ ). При превышении температуры Кюри сегнетоэлектрик переходит в

параэлектрическое состояние, а сопротивление элемента в узком температурном диапазоне до  $\Theta_{np}$  возрастает на несколько порядков из-за того, что на границах зерен образуется запирающий слой, в результате чего сопротивление растет по экспоненциальному закону.

При дальнейшем превышении температуры сопротивление снова падает, как у термисторов. Рабочей областью позистора является область от  $\Theta_k$  до  $\Theta_{np}$ . Точку Кюри, а значит рабочий диапазон, можно сдвигать технологическим путем. Воспроизводимость температуры точки Кюри оценивается величиной  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Крутизна преобразования позисторов оценивается величиной от 30 до 150% на  $^\circ\text{C}$  и является самой большой для параметрических температурных датчиков. Серийные позисторы: СТ-5, СТ-6. Номиналы сопротивлений от десятков ом до сотен килоом, а рабочий диапазон температур от  $-60$  до  $+200^\circ\text{C}$ .

*Кремниевые термометры сопротивления* также имеют положительный температурный коэффициент порядка 0,7% на градус Цельсия при температуре  $25^\circ\text{C}$ . Рабочий диапазон температур от  $-50$  до  $+120^\circ\text{C}$ .

Эти резисторы изготавливаются по планарной технологии посредством диффузии примесей (обычно n-типа) через отверстие маски в пластину монокристаллического кремния. Отклонение от номинальных значений не более 1%.

Изменение сопротивления кремния от температуры зависит от количества примеси. Существуют две области температур с различным изменением сопротивления. При температуре ниже  $120^\circ\text{C}$  сопротивление увеличивается с ростом температуры вследствие снижения подвижности носителей заряда, концентрация которых остается постоянной, т. к. определяется количеством диффундировавших в кремний примесей и значительно превосходит концентрацию носителей зарядов, образующихся вследствие термической ионизации кремния (образование электронно-дырочных пар). При более высоких температурах сопротивление уменьшается с ростом температуры. Как и у термисторов, определяющей здесь является термическая

ионизация, которая создает концентрацию носителей заряда, значительно превышающую концентрацию примесей.

*Кристаллические полупроводниковые термодатчики* на основе полупроводниковых диодов и транзисторов используют изменение напряжения на переходе в прямом направлении, которое достаточно постоянно для каждого типа прибора и мало зависит от величины протекаемого тока. Оно составляет 1,84 мВ/К для германиевых и 2,12 мВ/К для кремниевых диодов. У германиевых диодов статическая характеристика линейна в интервале от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ , у кремниевых – от  $-270^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ . При прямом токе в 1 мА напряжение на германиевом диоде около 210 мВ, на кремниевом – 260÷600 мВ, т. е. крутизна преобразования 0,8%/К.

При измерении температуры с помощью транзисторов используется зависимость от температуры напряжения эмиттер – база в прямом направлении. В качестве примера приведем технические характеристики термотранзистора типа ТГ001Ж:

- диапазон рабочих температур от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ;
- термочувствительный параметр – напряжение эмиттер–база;
- крутизна преобразования при  $U_{эб} = 200$  мВ – 10мВ/К;
- разброс начального номинального напряжения не более 0,5%;
- разброс крутизны преобразования в партии не более 0,5%;
- стабильность за год не хуже 0,05%;
- нелинейность статической характеристики не более 1%;
- постоянная времени на воздухе не более 10с.

Полупроводники широко используются для измерений в области сверхнизких температур. Так, термометры сопротивления из германия легированного гелием можно использовать для измерения температур в диапазоне от 1 до 5 К.

Такие термометры характеризуются высокой точностью и чувствительностью (до 0,001К). Если германий легирован мышьяком, то чувствительность снижается, а диапазон измерения расширяется до 1÷80К.

*Пример* измерительной схемы на транзисторе приведен на рис. 3.17.

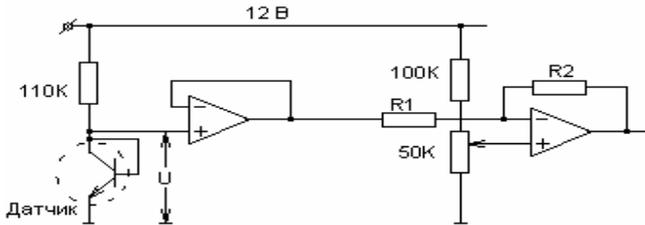


Рис. 3.17.

*Интегральные датчики температуры* выполняются в виде *интегральных схем*, которые генерируют на выходе электрический ток, пропорциональный абсолютной температуре. Они обладают хорошей линейностью и имеют чувствительность  $\sim 1$  мкА на градус Кельвина. Они эффективны в дистанционных измерениях, так как выходной ток зависит только от температуры и можно пренебречь сопротивлением линии связи (т. е. они являются источником тока).

Другие типы интегральных датчиков генерируют на выходе напряжение, пропорциональное температуре ( $\sim 10$  мВ на градус Кельвина).

### 3.5. Измерение температуры по тепловому шуму

Тепловое движение носителей заряда создает в резисторе флуктуации напряжения или тока, которые зависят от температуры  $T$  и имеют мгновенные значения  $E_{ш}$  и  $I_{ш}$ .

Эффективное значение шумового напряжения равно:

$$\sqrt{\overline{E_{ш}^2}} = \sqrt{4kT\Delta fR},$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура в К;  $\Delta f$  – полоса измерительной аппаратуры;  $R$  – среднеквадратичное значение напряжения шума.

Источник шума можно представить по схеме источника напряжения или источника тока (рис. 3.18).

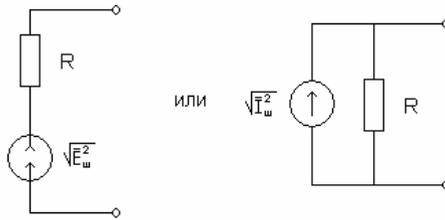


Рис. 3.18.

Эффективное значение тока выражается формулой

$$\sqrt{\bar{I}_u^2} = \sqrt{4kT\Delta f / R}.$$

Мощность шума равна

$$p_{ш} = \bar{E}_u^2 / R = \bar{I}_u^2 R = \sqrt{\bar{I}_u^2 \bar{E}_u^2} = 4kT\Delta f, \quad \text{т. е. не}$$

зависит от величины сопротивления  $R$ .

Измерение  $\sqrt{\bar{E}_u^2}$  с помощью вольтметра, регистрирующего эффективное значение напряжения, позволяет при известных  $R$  и  $\Delta f$  определить температуру  $T$ . Измерение мощности шума дает дополнительное удобство, т. к. не нужно знать сопротивление  $R$ .

### 3.6. Диэлектрические измерители температур

В диэлектрических измерителях температуры используется зависимость изменения емкости  $C(\theta)$  от температуры. Для плоского конденсатора емкость равна:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon s}{d},$$

где  $s$  – площадь пластин;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $d$  – расстояние между пластинами. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика  $\epsilon$  зависит от температуры  $\Theta$  (рис.3.19).

Для температур выше точки Кюри  $\theta_k$  зависимость  $\epsilon(\theta)$

описывается законом Кюри-Вейса:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{A}{\theta - \theta_k},$$

где  $A$  – константа Кюри-Вейса.

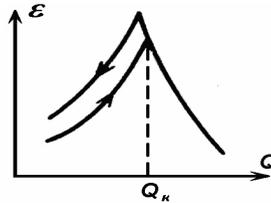


Рис. 3.19.

Для измерения температуры  $\theta$  в основном используют область температур  $\theta > \theta_k$  (где нет гистерезиса).

У различных сегнетоэлектрических материалов значения  $\theta_k$  отличаются друг от друга, что позволяет перекрыть достаточно широкий диапазон температур. Крутизна преобразования емкостных керамических датчиков, их конструктивное оформление и динамические характеристики подобны термисторам.

Преимуществом диэлектрических датчиков перед резистивными датчиками является меньшая погрешность от разогрева. Мощность, рассеиваемая на термисторе с сопротивлением  $r$ , равна  $P_T = \frac{u^2}{r}$ .

Для конденсатора емкостью  $C$ , имеющего активные потери в диэлектрике  $r$ , мощность, рассеиваемая в диэлектрике, равна:

$$P_K = I^2 r = \frac{u^2}{z^2} \cdot r^2 = \frac{u^2 r}{r^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}} = \frac{u^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{(1 + \operatorname{tg}^2 \delta) r} = P_T \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta + 1},$$

где  $\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{1/\omega C} = r \omega C$  – тангенс угла потерь в диэлектрике. Если учесть, что  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ , то в случае термоконденсатора можно увеличить точность измерения при тех же токах или увеличить

токи без ухудшения точности измерений. Кроме того, конденсаторные датчики не подвержены влиянию магнитных полей.

### 3.7. Кварцевый термометр

При использовании кварца в качестве датчика температуры  $\theta$  выбирают такой срез, при котором частота генератора является квазилинейной функцией  $\theta$ . Частоты колебаний, которые могут возникать в пластинке кварца, определяются формой, размерами и срезом пластинки:  $f = \frac{n}{l} \sqrt{\frac{c}{\rho}}$ , где  $c$  – модуль упругости;  $\rho$  – плотность кварца;  $l$  – размер в направлении распространения колебаний;  $n$  – целое число от 1 до 5 (количество полувольт, укладываемых на длине  $l$ ).

Электроды выполняются напылением в вакууме или из фольги.

Вблизи одной из резонансных частот механических колебаний пластинка кварца может быть представлена двухполюсником, состоящим из двух параллельных ветвей (рис. 3.20).

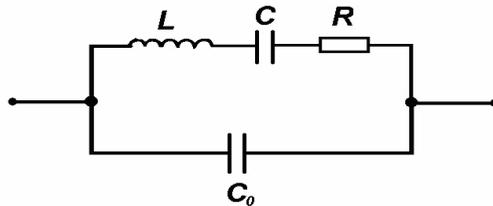


Рис. 3.20.

Параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$  определяются геометрическими, механическими и кристаллографическими характеристиками пластины. Емкость  $C_0$  обусловлена наличием металлических электродов.

Этот двухполюсник имеет две цепи резонанса: последовательную  $L, C, R$ , с резонансной частотой  $f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , и

параллельную, с частотой  $f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC/(1+C/C_0)}}$ .

Импеданс эквивалентного двухполюсника (рис. 3.20) можно представить в виде  $Z_q = R_q + X_q$ . Зависимости  $R_q$  и  $X_q$  от частоты представлены на рис. 3.21.

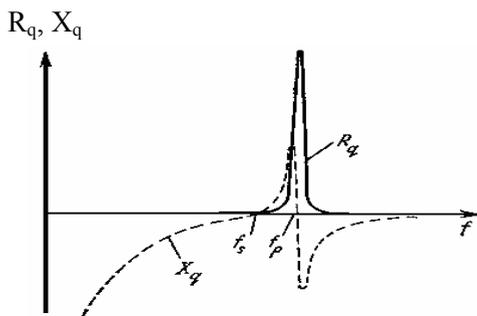


Рис. 3.21.

С изменением температуры изменяются размеры пластинки, ее плотность и модуль упругости, что приводит к изменению резонансных частот. Если кварцевая пластинка включена в качестве колебательного контура в генератор синусоидальных колебаний, то с изменением температуры будет изменяться частота генерируемых колебаний.

Датчик, в котором используются пьезорезонансные свойства пластины, называется *пьезорезонансным датчиком* (ПРД).

Генератор синусоидальных сигналов состоит из усилителя и цепи обратной связи (рис. 3.22, а). Простейший генератор на полевом транзисторе представлен на рис. 3.22, б.

В общем случае зависимость частоты  $f$  от температуры выглядит так:  $f(\Theta) = f_0(1 + A\Theta + B\Theta^2 + C\Theta^3)$ .

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  зависят от среза пластины. Срез  $LC$  (линейный) характеризуется нулевым значением коэффициентов  $B$  и  $C$ , поэтому чувствительность резонансной частоты к температуре

для него является постоянной величиной  $S = \frac{\Delta f}{\Delta \Theta} = A f_0$ . При  $A = 35,45 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $f_0 = 28,08 \text{ МГц}$  имеем  $S = 1000 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ .

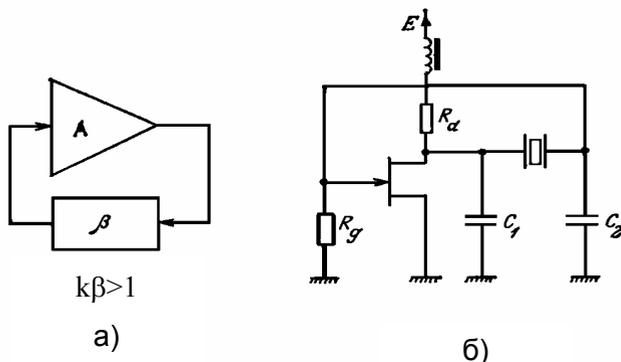


Рис. 3.22.

Датчик температуры представляет собой пластину кварца, помещенную в стальной корпус, заполненный гелием для увеличения теплопроводности. На рис. 3.23 приведена блок-схема измерительного канала с кварцевым термометром. Генератор  $\Gamma$  на кварце выдает сигнал с частотой  $f_\Theta$ . Опорный генератор  $\Gamma_0$  выдает постоянную частоту  $f_0$ . Оба сигнала подаются на умножитель, на выходе которого присутствуют частоты  $f_\Theta + f_0$  и  $f_\Theta - f_0$ . Фильтр низких частот  $\Phi$  выделяет сигнал с частотой  $f_\Theta - f_0 = \Delta f$ , по которой определяется температура  $\Theta$ .

*Пример.* Кварцевый термометр фирмы Hewlett Packard имеет следующие параметры: диапазон измерений –  $80 \text{ } ^\circ\text{C} \div +250 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; нелинейность –  $0,05\%$ ; чувствительность –  $1000 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ ; разрешающая способность –  $0,0001^\circ\text{C}$ ; погрешность из-за гистерезиса –  $0,05^\circ\text{C}$ ; быстродействие –  $2,5 \text{ с}$ .

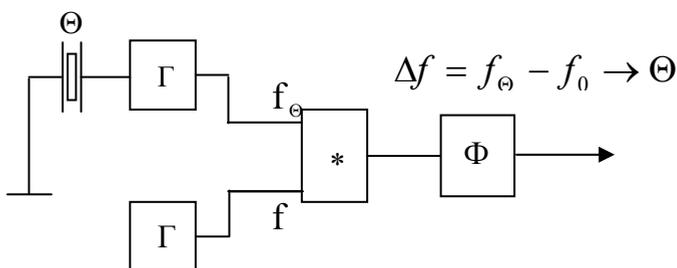


Рис. 3.23.

### 3.8. Радиационные термометры

Радиационный термометр относится к дистанционным измерителям температуры. Он определяет энергию излучения тела, которая является функцией температуры. В общем случае термометр представляет собой устройство, которое содержит оптическую систему, преобразователь энергии излучения, электронную схему для согласования преобразователя с последующими блоками (рис. 3.24).

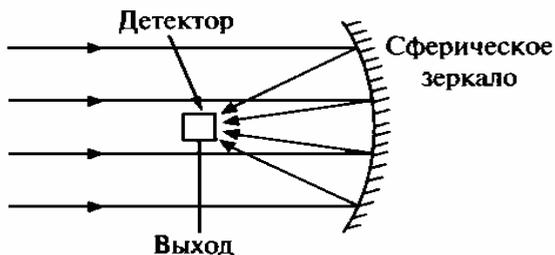


Рис. 3.24.

Полная мощность излучения на единицу поверхности абсолютно черного тела при температуре  $\Theta$  определяется выражением  $P = \sigma\theta^4$ , где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Реальные тела имеют меньшие излучения, поэтому вводится поправочный коэффициент, называемый степенью черноты.

Термопара, термометр сопротивления, термистор являются широкополосными датчиками и, следовательно, измеряют полную мощность излучения. Сигнал на выходе будет пропорционален  $\Theta^4$ . Фотосопротивление, фотоэмиссионные элементы являются узкополосными датчиками. Можно использовать также светофильтр, чтобы еще более сузить полосу пропускания. Выходной сигнал такого преобразователя пропорционален

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda\Theta}}$ , где  $\lambda$  – средняя длина волны полосы пропускания;

$\Delta\lambda$  – ширина этой полосы;  $C_2$  – постоянная;  $\Theta$  – температура в градусах Кельвина.

В некоторых приборах для повышения чувствительности используется механический вращающийся диск или заслонка для модуляции излучения перед приемником, чтобы получить переменный выходной сигнал.

Погрешность радиационных термометров обычно около  $\pm 0,5\%$ , а диапазон измерения от 0 до 3000 °С и выше.

### **3.9. Термометры, использующие эффект расширения материалов**

*Биметаллические термометры* состоят из двух пластинок с разным коэффициентом линейного расширения. При изменении температуры они изгибаются. Если один конец биметаллической пластинки зафиксирован, то величина перемещения второго конца является мерой температуры (рис. 3.25, а). Это перемещение может быть использовано для размыкания и замыкания контактов, что часто используется в бытовых приборах.

Если биметаллическую пластину выполнить в виде спирали, то перемещение свободного конца можно использовать для перемещения стрелки по шкале (рис. 3.25, б).

*Жидкостные термометры* используют эффект изменения объема жидкости при изменении температуры. В стеклянных термометрах жидкость перемещается по капиллярной трубке, что позволяет производить непосредственный отсчет температуры по

шкале. Такие термометры весьма хрупкие и обладают медленной реакцией на изменение температуры, но весьма дешевы и при стандартных условиях дают приемлемую точность.

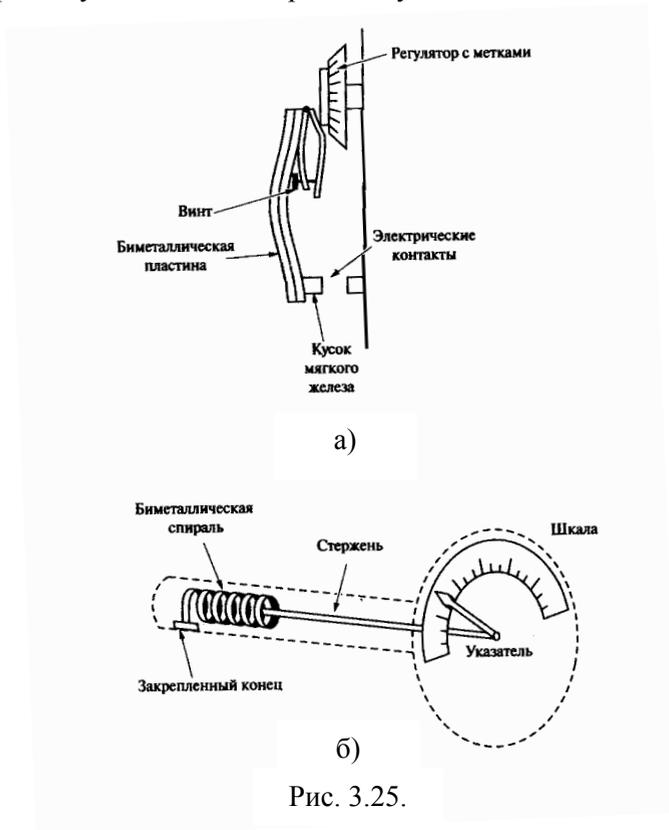


Рис. 3.25.

Диапазон измеряемых температур составляет для: ртути – от  $-35$  до  $600^{\circ}\text{C}$ ; спирта – от  $-80$  до  $70^{\circ}\text{C}$ ; толуола – от  $-80$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ; пентана – от  $-200$  до  $30^{\circ}\text{C}$ ; креозота – от  $-5$  до  $200^{\circ}\text{C}$ .

При измерении термометр погружается до определенного уровня, иначе появляется дополнительная погрешность. Обычно точность таких термометров составляет  $\pm 1\%$ .

В металлических термометрах жидкость заключена в металлическую колбу, соединенную капиллярной трубкой с манометром Бурдона. При нагревании жидкость расширяется и в

ней повышается давление, которое измеряется манометром.

Диапазон измерения температур для: ртути – от  $-39$  до  $650^{\circ}\text{C}$ ; спирта – от  $-46$  до  $150^{\circ}\text{C}$ ; эфира – от  $-20$  до  $90^{\circ}\text{C}$ .

В целом диапазон измерения температуры такими приборами составляет от  $-90$  до  $+650^{\circ}\text{C}$ . Погрешность измерения  $\pm 1\%$ . Источником погрешностей для таких термометров является жидкость в соединительной трубке, температура которой также воздействует на давление. Ошибка снижается при уменьшении объема соединительной трубки, поэтому используется капиллярная трубка.

Другие источники погрешностей: ошибка гидравлического подпора (разность высот измерительной колбы и трубки Бурдона), ошибка от окружающего давления и ошибка степени погружения измерительной колбы.

*Газовый термометр* устроен так же, как и жидкостный с трубкой Бурдона. Он заполнен газом, например азотом. При нагревании давление газа растет и измеряется манометром. Диапазон измерений – от  $-100$  до  $+650^{\circ}\text{C}$ . Погрешность измерений  $\pm 0,5\%$ . Источники погрешностей те же, что и для жидкостного термометра, кроме гидравлического подпора, которым здесь можно пренебречь.

*Термометр по давлению пара* состоит из термометрической колбы, соединенной с манометром Бурдона и частично заполненной жидкостью. Повышение температуры увеличивает количество испарившейся жидкости и повышает избыточное давление ее паров, которое измеряется манометром Бурдона. Зависимость давления от температуры нелинейная.

Диапазон измерения температур зависит от заполняющей жидкости. Для метилхлорида: от  $0$  до  $50^{\circ}\text{C}$ , диоксида серы: от  $30$  до  $120^{\circ}\text{C}$ , диэтилового эфира: от  $60$  до  $160^{\circ}\text{C}$ , этанола: от  $30$  до  $180^{\circ}\text{C}$ , воды: от  $120$  до  $220^{\circ}\text{C}$ , толуола: от  $150$  до  $250^{\circ}\text{C}$ .

Прибор прочный, позволяет делать как непосредственные, так и дистанционные измерения. Он лучше жидкостных металлических термометров, но имеет нелинейную шкалу и погрешность около  $1\%$ . Источники погрешностей те же, что и для жидкостных термометров.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие шкалы температуры вы знаете?
2. Назовите термоэлектрические эффекты в проводниках.
3. На каком физическом эффекте основана работа термопары?
4. Какие соображения учитываются при конструировании термопары?
5. Что такое удлинительные термоэлектроды?
6. Приведите конструктивные разновидности термопар.
7. С какой целью используется термостатирование холодного спая термопары?
8. Какие методы учета нестабильности температуры холодного спая вы знаете?
9. Как влияет сопротивление линии связи и самой термопары на погрешность измерений температуры?
10. На каком принципе действия основана работа термометра сопротивления?
11. На каком принципе действия основана работа полупроводниковых термодатчиков?
12. Что такое позистор?
13. Что такое интегральные датчики температуры?
14. Как измерить температуру по тепловому шуму?
15. На каком принципе работают диэлектрические датчики температуры?
16. Какой принцип действия у пьезорезонансного датчика температуры?
17. На каком принципе действия работает радиационный термометр?
18. Как эффект теплового расширения металлов используется для измерения температуры?

## 4. ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Все механические величины условно можно разделить на 3 группы.

К 1-й группе относятся линейные и угловые перемещения. Диапазон измерения линейных перемещений от единиц ангстрем до многих тысяч километров, а угловых – в пределах 3-4 порядков.

Ко 2-й группе можно отнести силовые воздействия (механические напряжения, силы, моменты, давление и т. п.). Диапазон измерений здесь также огромен. Давление, например, измеряют от  $10^{-8}$  до  $10^8$  Па.

К 3-й группе относятся механические величины, характеризующие движение (скорость, ускорение). Диапазон измерений здесь также очень велик.

### 4.1. Датчики линейных и угловых перемещений

Простейший преобразователь перемещений представляет собой резистивный потенциметрический делитель. Потенциометр состоит из трека длиной  $L$  (или  $\alpha_M$ ) сопротивлением  $R_n$ , на котором равномерно намотана высокоомная проволока или нанесен пленочный проводящий пластик, по которому перемещается

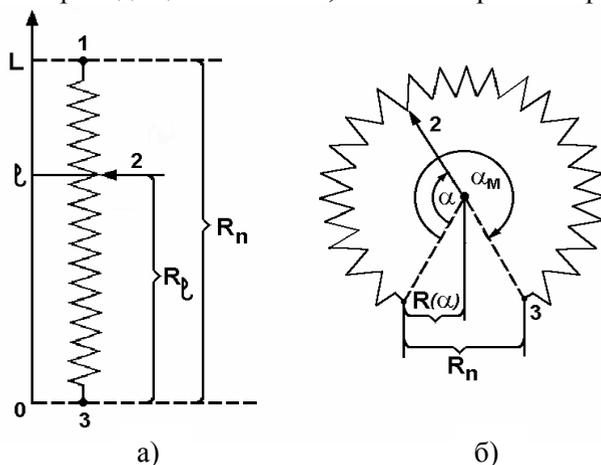


Рис. 4.1.

электрический скользящий контакт.

Контакт соединяется с объектом. Напряжение, снимаемое с движка потенциометра, пропорционально линейному  $l$  или угловому  $\alpha$  перемещению объекта (рис. 4.1, а, б). Соответствующие им значения сопротивлений равны  $R_l$  и  $R_\alpha$ .

Разрешение для проволочных треков составляет  $1,5 \div 0,5$  мм, для пленочных треков оно определяется размерами контакта. Нелинейность  $0,1 \div 1\%$  для проволочного трека и около  $0,05\%$  для проводящего пластика. Сопротивление  $20 \text{ Ом} \div 200 \text{ кОм}$  для проволочного трека и  $500 \text{ Ом} \div 80 \text{ кОм}$  для проводящего пластика.

Проводящий пластик имеет более высокую температурную зависимость по сравнению с проволокой.

На точность измерений влияет величина сопротивления нагрузки.

Износ контакта существенно ограничивает срок службы потенциометра. Разработаны бесконтактные реостатные элементы, управляемые с помощью узкого светового луча (рис. 4.2).

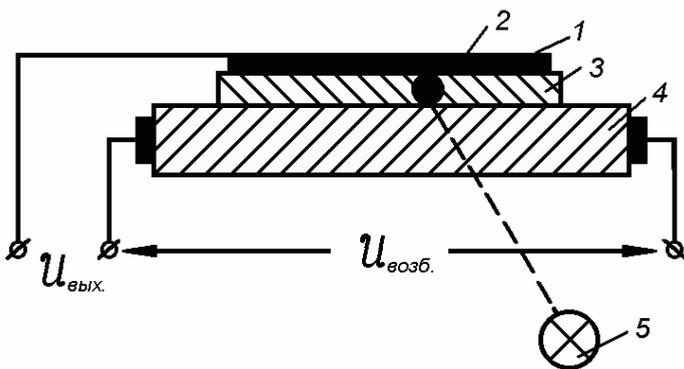


Рис. 4.2.

В таком датчике фоточувствительный слой 3 контактирует со слоем металла высокого сопротивления 4 и контактной шиной 1. Фоточувствительный слой в точке падения луча 2 от источника 5 становится проводящим и выполняет роль подвижного контакта. Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  пропорционально перемещению и  $U_{\text{возб.}}$ .

Индуктивные преобразователи перемещения используют изменение самоиндукции катушки при приближении к ней магнитопроницаемого тела. Такие измерители являются обычно бесконтактными. В связанных индуктивных преобразователях сердечник катушки механически связан с телом, перемещение которого измеряется.

Наиболее типичными преобразователями этого типа являются индуктивные датчики с переменной длиной  $\delta$  воздушного зазора (рис. 4.3, а).

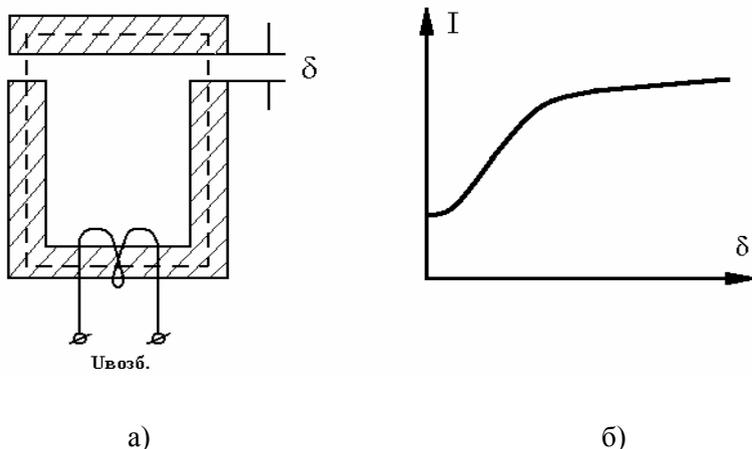


Рис. 4.3.

В этом случае сопротивление магнитной цепи в основном определяется воздушным зазором. Индуктивность датчика будет приблизительно равна  $L = w^2 \mu_0 S / (2\delta)$ , где  $w$  – число витков обмотки;  $\delta$  – величина воздушного зазора;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $S$  – поперечное сечение магнитопровода.

Учитывая, что активное сопротивление обмотки много меньше индуктивного, ток в цепи возбуждения будет равен  $I = U_{\text{возб}} \delta / (\omega w^2 \mu_0 S)$ , где  $\omega$  – частота напряжения возбуждения  $U_{\text{возб}}$ . Зависимость  $I = f(\delta)$  показана на рис. 4.3, б. При  $\delta = 0$  ток  $I \neq 0$ , т. к. магнитное сопротивление магнитопровода  $R_{\mu} \neq 0$ , а  $L \neq \infty$ .

Недостатком индуктивного преобразователя является также наличие электромагнитной силы, действующей на якорь. От этих

недостатков свободен датчик, построенный по дифференциальной схеме (рис. 4.4, а).

Если не учитывать входного сопротивления измерительного прибора, статическая характеристика такого датчика линейна и проходит через нуль (рис. 4.4, б).

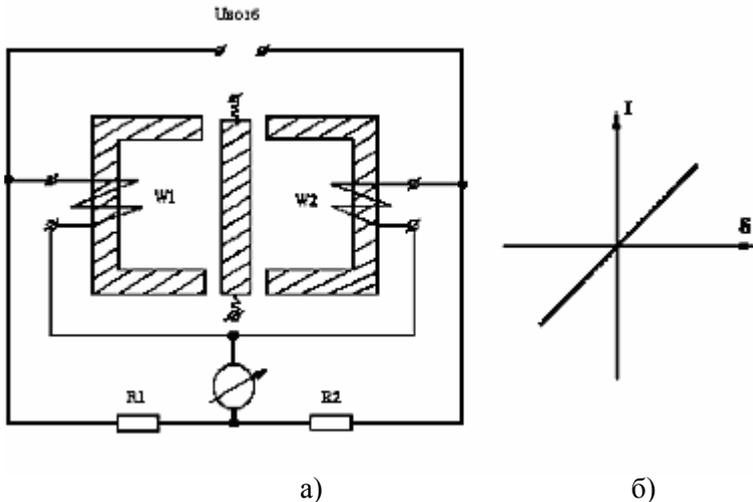


Рис. 4.4.

*Использование принципа усиления потокосцепления.* Датчики этого типа являются трансформаторными, т. е. имеют как минимум две обмотки, одна из которых используется для возбуждения, а со 2-й снимается выходной сигнал.

На рис. 4.5 представлены два возможных варианта дифференциально-трансформаторных датчиков (а, б), их эквивалентная схема (в), эпюры выходных напряжений для различных положений плунжера (г) и зависимость выходного напряжения от положения плунжера (д).

В схеме рис. 4.5, а ферромагнитный плунжер 5, перемещаясь по горизонтали, изменяет потокосцепление между обмоткой возбуждения 2 и выходными обмотками 1 и 3. При этом максимальное потокосцепление и как следствие максимальный

выходной сигнал получаем на той обмотке, вблизи которой находится плунжер.

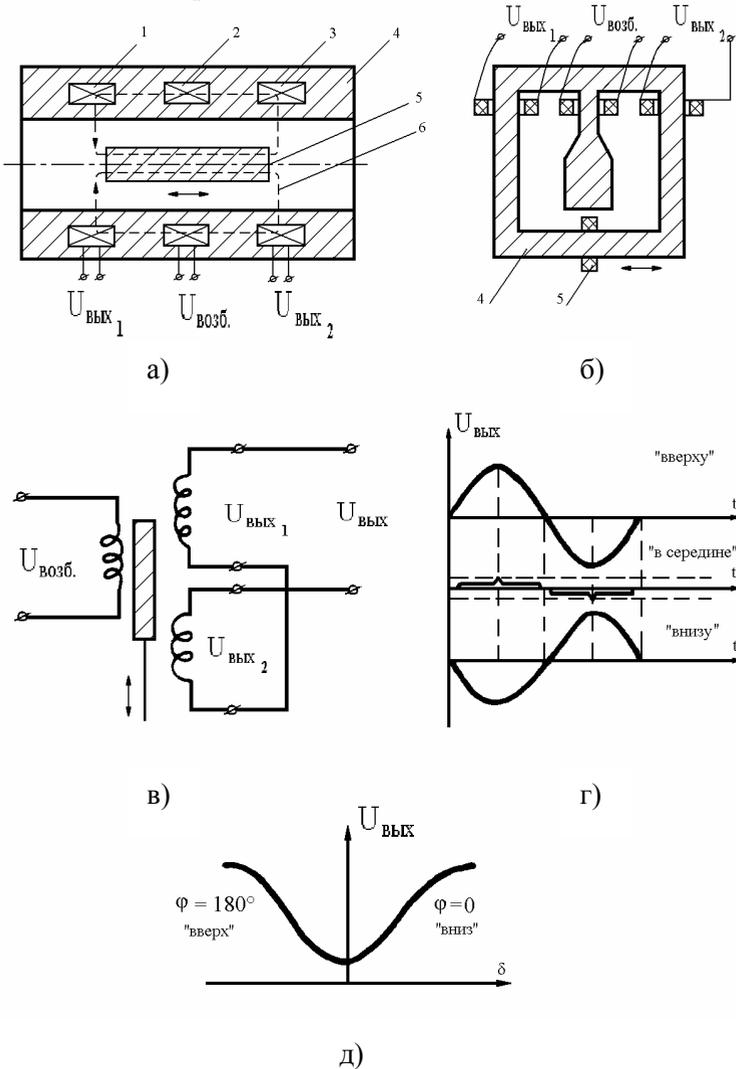


Рис. 4.5.

В схеме рис. 4.5, б роль плунжера играет короткозамкнутый виток 5. Перемещение витка в каком-либо направлении приводит к

уменьшению потокоцепления в этом же направлении. Из-за неидентичности обмоток в среднем положении плунжера выходной сигнал  $U_{\text{вых}} \neq 0$ , что повышает порог чувствительности устройства или его погрешность.

Метрологические характеристики определяются конструкцией и точностью изготовления датчика.

С помощью специальной конфигурации сердечника можно измерять угловые перемещения, т. е. при повороте сердечника вокруг оси будет изменяться потокоцепление между первичной и вторичной обмотками.

Для повышения линейности характеристики  $U_{\text{вых}}=f(\delta)$  применяют специальную намотку обмоток, когда обмотка намотана поперек другой, а кол-во витков изменяется вдоль длины намотки.

*Микросин.* Этот небольшой механизм состоит из ферромагнитных статора с четырьмя полюсами и ротора. На каждом полюсе намотаны по две обмотки, первичная и вторичная. Первичные обмотки соединены последовательно и питаются переменным напряжением  $e_s$  с частотой до 10 кГц. Вторичные обмотки соединены последовательно и включены две согласно, а две встречно (рис. 4.6). Напряжение на выходе равно  $U_m = e_1 + e_3 - e_2 - e_4$ , где  $e_1, e_2, e_3, e_4$  – напряжения на вторичных обмотках.

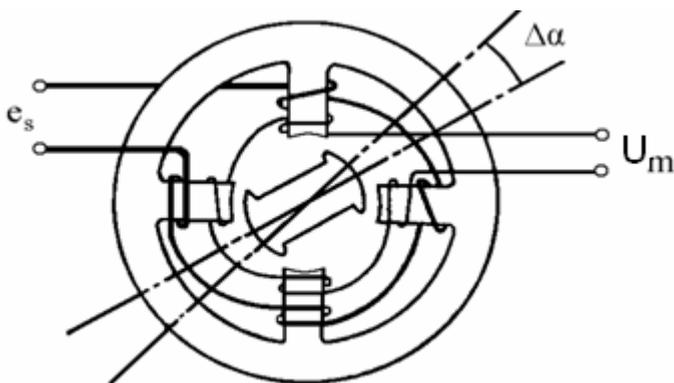


Рис. 4.6.

Когда ротор расположен симметрично относительно полюсов (как показано на рис.),  $U_m = 0$ . Это нуль датчика. При отклонении от этого положения возникает  $U_m \neq 0$ .

Метрологические характеристики микросина: диапазон измерений  $\pm 10^\circ$ ; чувствительность до 0,1 В на 1 В и  $1^\circ$ ; отклонение от линейности  $0,5 \div 1\%$  диапазона измерения.

*Индуктивный потенциометр* состоит из статора и ротора, на которых намотаны обмотки, которые можно уподобить плоской катушке (рис. 4.7, а, б). Первичная обмотка 2 на роторе питается переменным напряжением. При  $\theta = 0$  напряжение на вторичной обмотке 1 (статора) равно 0. При  $\theta \neq 0$  напряжение на выходе вторичной обмотки  $U_{\text{вых}} = U_m \sin \theta$  или  $U_m \theta$  для малых  $\theta$ , где  $U_m$  – напряжение питания первичной обмотки.

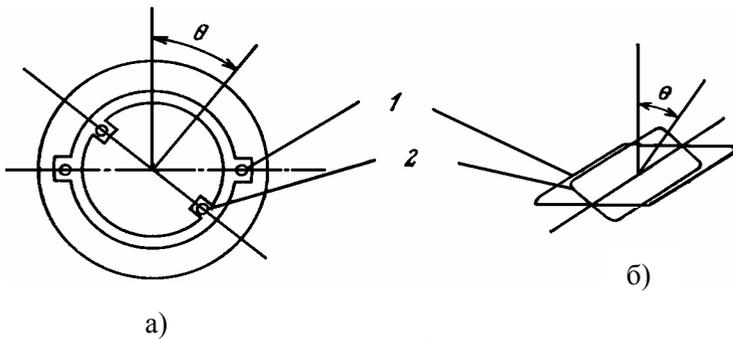


Рис. 4.7.

Расположением обмоток можно увеличить диапазон линейности. Характеристики индуктивного потенциометра: диапазон измерений  $0 \div 60^\circ$ ; чувствительность от 0,5 В до 20 мВ на 1 В и  $1^\circ$ ; нелинейность от 0,1 до 0,5%.

*Сельсин* состоит из однофазного ротора и трехфазного статора, обмотки которого расположены под углом  $120^\circ$ . Измерительная система состоит из двух сельсинов, статорные обмотки которых попарно соединены (рис. 4.8).

Переменное напряжение  $E \cos \omega t$  подается на ротор сельсина датчика СД, оно вызывает индукцию В, которая индуцирует в статорных обмотках  $w_1, w_2, w_3$  ЭДС. Текут токи  $i_1, i_2, i_3$ , которые в

обмотках статора сельсина–приемнике СП вызывают индукцию  $B_d$ , направление которой совпадает с  $B$ . Магнитная индукция  $B_d$  в роторе сельсина приемника СП наводит ЭДС, равную  $U_{\text{вых}} = U_m \cos(\theta_d - \theta_n)$ , где  $U_m$  – напряжение на выходе при  $\theta_d - \theta_n = 0$ .

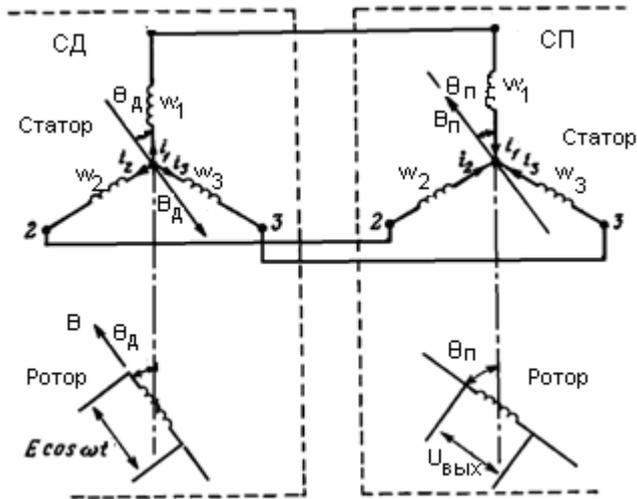


Рис. 4.8.

Характеристики сельсинов: диапазон измерений –  $360^\circ$ , чувствительность вблизи нуля – от 10 до 100 мВ на 1В и  $1^\circ$ , точность – от  $5'$  до  $30'$ .

Сельсины в таком режиме (трансформаторный режим) используются в приводах для поворота исполнительных механизмов на нужный угол.

Если ротор СП питать тем же напряжением  $E \cos \omega t$ , то возникает момент, который поворачивает ротор СП в то же положение, что и у СД, т. е.  $\theta_d = \theta_n$ . Это индикаторный режим работы сельсинов.

*Поворотные трансформаторы (ПТ)* – это машины переменного тока для преобразования угла поворота  $\theta$  в напряжение, пропорциональное некоторым функциям угла ( $\sin \theta$ ,  $\cos \theta$ ) или самому углу  $\theta$ .

Конструкция ПТ представляет собой электрическую машину, в пазах статора и ротора размещены по две распределенные обмотки, сдвинутые между собой на  $90^\circ$  (рис. 4.9).

На рисунке  $c_1, c_2$  – главная обмотка статора,  $c_3, c_4$  – вспомогательная обмотка статора,  $p_1, p_2$  и  $p_3, p_4$  – синусная и косинусная обмотки ротора.

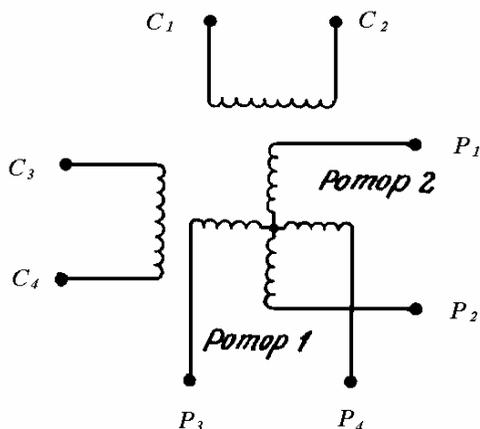


Рис. 4.9.

Отсчет угла поворота производится от оси синусной обмотки. Вывод обмоток ротора осуществляется через щеточный контакт или с помощью спиральных пружин, которые допускают до двух оборотов ротора. Конструкция ПТ должна обеспечивать изменение взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора по закону синуса с погрешностью  $0,05\%$ . Это обеспечивается технологией изготовления. Существует 4 класса точности ( $0 \div 3$  кл.). Используются различные схемы включения для различных назначений.

*Индукосин* – это линейка с  $2N$  последовательно связанными проводниками, расположенными параллельно друг другу (рис. 4.10).

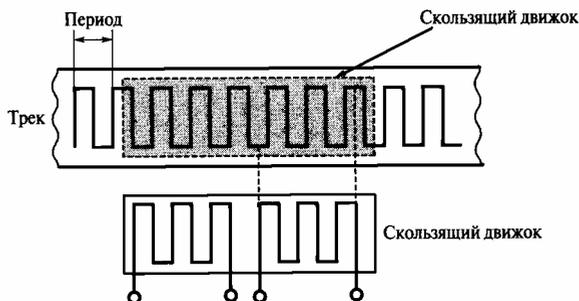


Рис. 4.10.

Она изготавливается фотоспособом на изолирующей подложке, которая закреплена на металлической рейке. Скользящий нониус состоит из таких же проводников, образующих две системы. Одна сдвинута на одну четвертую шага относительно другой. Относительное перемещение двух частей индуктосина изменяет электромагнитное взаимодействие контуров, расположенных на них. Если линейку питать переменным напряжением  $E \cos \omega t$ , то ток, проходящий по проводникам, индуцирует в каждом контуре скользящего нониуса ЭДС  $e_{c1}$  и  $e_{c2}$ , амплитуды которых являются периодическими функциями положения с периодом, равным шагу. При перемещении нониуса можно посчитать количество пройденных проводников и определить направление движения. Помимо линейных индуктосинов бывают круговые, у которых проводники расположены по радиусу, а принцип работы такой же, как у линейных.

*Оптические датчики* перемещений основаны на том же принципе: счете черных и светлых полос (рис. 4.11). Длинная решетка, имеющая ряд прозрачных и непрозрачных полос, зафиксирована на объекте, который перемещается. Короткая решетка имеет такие же полосы, наклоненные по отношению к полосам длинной решетки на небольшой угол. Свет, проходящий через обе решетки, образует на фотодатчиках муаровые полосы, ширина которых зависит от шага полос на решетках и угла между

полосами длинной и короткой решеток. Два фотодатчика, сдвинутые на одну четвертую шага, позволяют определить направление движения и посчитать количество полос. Разрешающая способность таких датчиков составляет одну четвертую шага и доходит до величины 1 мкм при шаге 4 мкм.

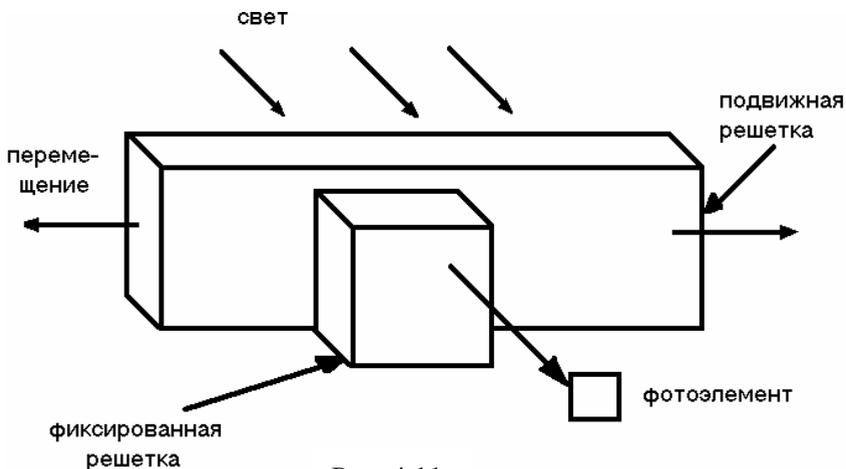


Рис. 4.11.

*Емкостной датчик положения* представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого испытывает перемещение, вызывая изменение емкости. В случае плоского конденсатора перемещение обкладки происходит либо в собственной плоскости, либо перпендикулярно своей плоскости.

В случае цилиндрического конденсатора обкладка перемещается только параллельно оси цилиндра.

Конденсатор может быть одиночным или двойным дифференциальным. Примеры одиночных емкостных датчиков приведены на рис. 4.12, а, б, а двойных дифференциальных – на рис. 4.12, в, г.

Емкостные датчики отличаются своей простотой, что позволяет создавать прочные и надежные конструкции.

Для плоского конденсатора емкость определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между

обкладками,  $s$  – площадь перекрытия обкладок,  $\delta$  – расстояние между обкладками.

Конденсатор с переменным зазором может использоваться лишь для измерения перемещений в малом диапазоне (обычно меньше 1 мм), тогда как конденсатор с переменной площадью обкладок пригоден для измерений в более широком диапазоне (более 1 см).

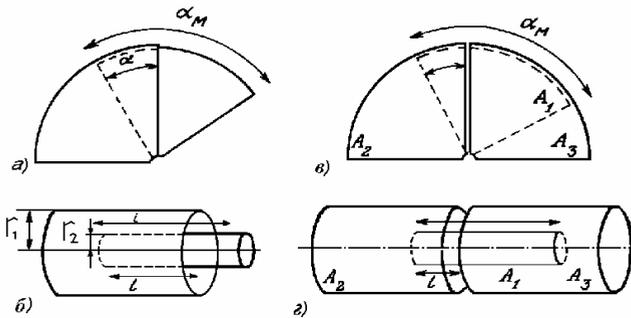


Рис. 4.12.

Для цилиндрического конденсатора емкость равна  $C = \frac{2\pi\epsilon l}{\lg(r_2/r_1)}$ , где  $l$  – глубина погружения внутреннего цилиндра радиуса  $r_1$  во внешний цилиндр радиуса  $r_2$ . Диэлектриком обычно служит воздух, поэтому емкость конденсатора зависит только от геометрических параметров.

Желательно, чтобы способ измерения обеспечивал линейную зависимость между перемещением и выходным сигналом.

Рассмотрим методы получения выходного сигнала с емкостного датчика. На рис. 4.13 изображена мостовая схема включения дифференциального конденсатора. Легко показать, что выходной

$$U_{\text{вых}} = \frac{e(C_1 - C_2)}{2(C_1 + C_2)}.$$

Это выражение является линейным по перемещению как для конденсатора с переменной площадью, так и для конденсатора с переменным зазором.

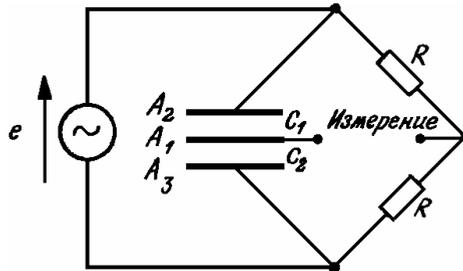


Рис. 4.13.

На рис. 4.14 приведена схема с операционным усилителем.

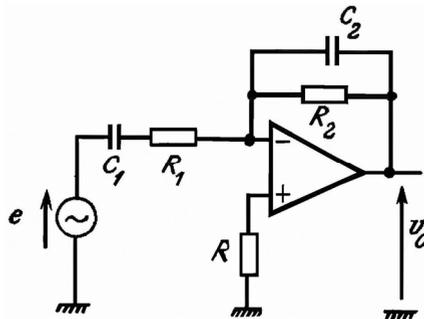


Рис. 4.14.

Один из конденсаторов  $C_1$  или  $C_2$  является датчиком. Полагая операционный усилитель идеальным, можно записать

$$U_{\text{ввд}} = -\frac{eZ_2}{Z_1}, \quad \text{где} \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + jR_2C_2\omega} \quad \text{и} \quad Z_1 = \frac{1 + jR_1C_1\omega}{jC_1\omega}.$$

$$\text{Тогда} \quad U_{\text{ввд}} = \frac{-jR_2C_1\omega e}{(1 + jR_1C_1\omega)(1 + jR_2C_2\omega)}.$$

Если  $R_1 C_1 \omega \ll 1$ , а  $R_2 C_2 \omega \gg 1$ , то  $U_{\text{вых}} = -\frac{e C_1}{C_2}$ .

Схема линейна по перемещению в следующих случаях:

а)  $C_1$  – конденсатор с переменной площадью обкладок;  $C_2$  – постоянная емкость;

б)  $C_1$  – постоянная емкость;  $C_2$  – конденсатор с переменным зазором между обкладками.

Эти выводы получены без учета паразитных емкостей и других факторов, рассмотренных ранее.

## 4.2. Датчики деформаций

Напряжение в материале вызывает его деформацию, измерение которой позволяет вычислить само напряжение. Датчик прикрепляется к изучаемому образцу и деформируется вместе с ним. Небольшие размеры датчика (1 мм ÷ 1 см) обеспечивают весьма точные измерения.

Любые физические величины, действие которых на образец вызывает его деформацию (давление, ускорение, момент сил т. п.), могут быть преобразованы с помощью датчиков деформации. В таком случае датчик деформаций и исследуемый образец составляют совокупный измеритель воздействующей величины, т. е. комбинированный датчик. Введем некоторые определения:

*Деформация*  $e = \frac{\delta l}{l}$  – отношение приращения размера объекта

к первоначальному значению. Упругая деформация исчезает после устранения вызвавших ее сил.

*Напряжение* – сила на единицу площади  $\sigma = \frac{F}{S}$ .

*Предел упругости* – максимальное напряжение, не вызывающее остаточной деформации, большей 0,2%.

*Закон Гука* гласит, что в области упругости деформации пропорциональны напряжениям.

*Модуль Юнга*  $Y$  определяет деформацию в направлении действия сил  $e_n = \frac{\sigma}{Y}$ .

Коэффициент Пуассона  $\nu$  определяет деформацию, перпендикулярную направлению действия силы  $e_{nn} = -\nu e_{nn}$ . В области упругости  $\nu \approx 0,3$ .

Наиболее часто для измерения деформаций используют резистивные датчики.

Наиболее широко используемыми материалами для датчиков являются металлы и полупроводники.

На рис. 4.15 показан способ крепления датчика к образцу. Материал датчика 7 наносится на подложку 2, которая приклеивается к исследуемой конструкции 1. Покрытие 4 защищает материал от коррозии. К контактным площадкам 3 и 5 подключен кабель 8. Вся конструкция датчика залита эпоксидной смолой 6.

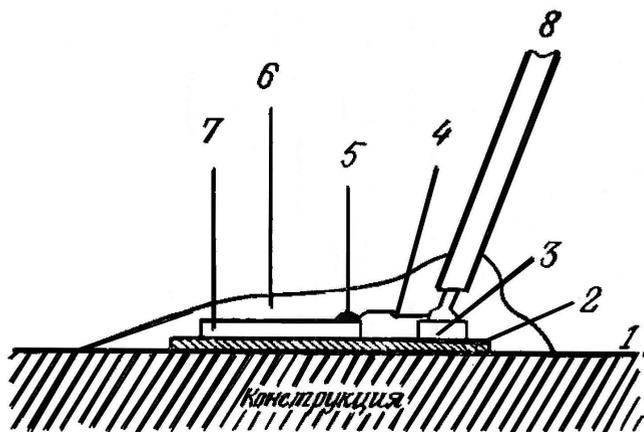


Рис. 4.15.

*Металлические тензорезисторы.* Принцип их действия основан на эффекте изменения сопротивления проводника от механической деформации. Датчик состоит из тонкой проволоки, прикрепляемой для удобства к некоторой подложке, которая в свою очередь крепится клеем или цементом к исследуемому объекту. На рис. 4.16 а, б, в, г показаны некоторые возможные конструкции датчиков.

При деформации происходит изменение всех параметров, характеризующих сопротивление. Для проводника, сопротивление

которого  $R = \frac{\rho l}{S}$ , изменение сопротивления будет равно

$$\Delta R = \Delta \rho \frac{l}{S} + \Delta l \frac{\rho}{S} - \Delta S \frac{\rho l}{S^2},$$

где  $\rho, l, S$  – соответственно удельное

сопротивление, длина и площадь поперечного сечения проводника.

Одной из информационных характеристик тензосопротивления является коэффициент относительной тензочувствительности

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}.$$

Для металлов значение  $k$  лежит в диапазоне от 1,6 до 6.

Диаметр проволоки составляет единицы или десятки микрон, а активный элемент имеет вид сетки (рис. 4.16, а). Но такая конструкция воспринимает деформацию и в поперечном направлении. В этом смысле преимущество имеют пленочные резисторы (рис. 4.16, б) за счет малого сопротивления и чувствительности в поперечном направлении.

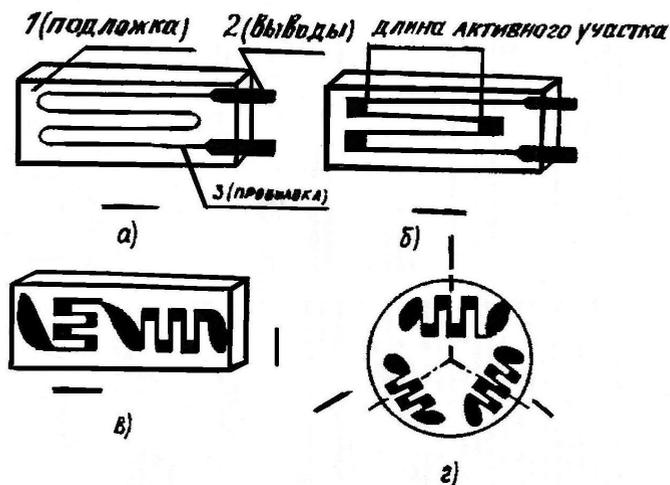


Рис. 4.16.

Кроме того, пленки меньше перегреваются от проходящего через них тока за счет большей поверхности теплоотдачи. На рис. 4.16, в, г показаны двухкомпонентные и трехкомпонентные измерители деформации.

Погрешность прибора с металлическими тензорезисторами при индивидуальной градуировке составляет десятые доли процента, а при отсутствии таковой –  $1\div 5\%$  за счет неидеальности датчиков.

Динамические характеристики определяются жесткостью материала подложки и клеевых соединений, и при определенных условиях тензорезисторы могут быть практически безинерционными.

При измерении больших деформаций используют тензорезисторы в виде резинового капилляра, заполненного ртутью.

*Полупроводниковые тензорезисторы* используют различные эффекты в полупроводниках для преобразования механических величин: пьезорезистивный эффект, характеризующий изменение удельного сопротивления материала (германия или кремния) от механических воздействий; эффект Холла; эффект изменения сопротивления р-п-перехода активного полупроводникового элемента.

*Пьезорезистивный эффект* состоит в том, что сопротивление полупроводника изменяется под действием механических напряжений. Величина относительного коэффициента тензочувствительности для полупроводниковых тензорезисторов достигает  $100\div 200$ .

Выпускаются так называемые *гедисторы и кремнисторы*, выполняемые из германиевой или кремниевой ленты. Типовые размеры таких элементов: длина – единицы мм; ширина – десятые доли мм; сопротивление тензорезистора – десятки или сотни Ом; относительный коэффициент тензочувствительности –  $50\div 200$ ; минимальные измеряемые деформации –  $10^{-10}$ ; разрушающие деформации –  $10^{-3}$ ; срок службы –  $10^6$  измерений.

Таким образом, полупроводниковые тензорезисторы по своим характеристикам превосходят металлические. Кроме того, выполнение полупроводникового измерительного преобразователя и схемы измерения в виде единой интегральной схемы уменьшает потери информации при передаче и обработке сигнала.

Для измерения малых перемещений можно использовать преобразователь, основанный на эффекте Холла.

*Эффект Холла* заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) на боковых гранях пластины,

находящейся в магнитном поле с индукцией  $B$ , при протекании по ней тока  $I$  в продольном направлении.

Преобразователь Холла (ПХ) представляет собой четырехполюсник из тонкой пластины или пленки из полупроводникового материала (рис. 4.17). Токковые электроды 1,2 выполнены по всей грани. Потенциальные (холловые) электроды 3 и 4 – в центральной части.

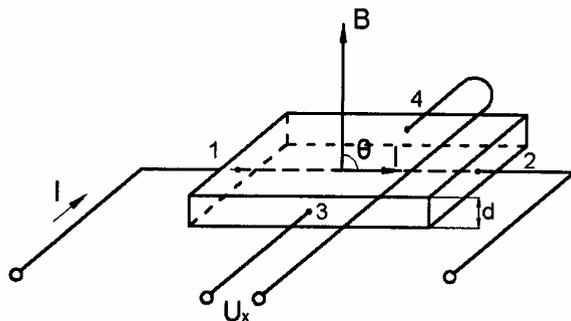


Рис. 4.17.

В магнитном поле носители заряда под действием сил Лоренца изменяют свою траекторию, и на боковых гранях концентрация зарядов одного знака увеличивается. Разность потенциалов между боковыми гранями определяется выражением: 
$$U_x = k_x \frac{IB \sin \theta}{d},$$
 где  $k_x$  – постоянная Холла,  $\theta$  – угол между векторами  $I$  и  $B$ ,  $d$  – толщина пластины.

В качестве материалов используется германий, кремний и полупроводники III и IV групп периодической системы. Для полупроводников  $k_x = 10^{-2} \div 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ . Для меди  $k_x = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$ .

Кристаллические ПХ вырезаются в виде пластин и шлифуются до нужной толщины (0,01 ÷ 0,2) мм. Выводы прикрепляются пайкой или сваркой. Пленочные датчики изготавливаются с помощью фотолитографии.

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  определяется как сопротивление между токковыми электродами, а выходное  $R_{\text{вых}}$  – как

сопротивление между холловыми электродами. У выпускаемых серийно датчиков  $R_{\text{вых}}$  лежит в пределах от 0,5 Ом до нескольких Ом.

Остаточное напряжение преобразователя Холла – это напряжение  $U_x$  при прохождении тока  $I$  и  $B=0$ . Причиной появления  $U_x$  является расположение холловых электродов в неэквипотенциальных зонах. При наличии градиента температур между холловыми электродами возникает термоЭДС ( $10 \div 100$  мкВ на  $0,1$  °С). Суммарное остаточное напряжение может составить от единиц микровольт до нескольких десятков милливольт. У серийных преобразователей Холла  $U_{\text{ост}}/I = 10^{-6} \div 0,4$  Ом. На рис. 4.18, а приведена схема коррекции остаточного напряжения

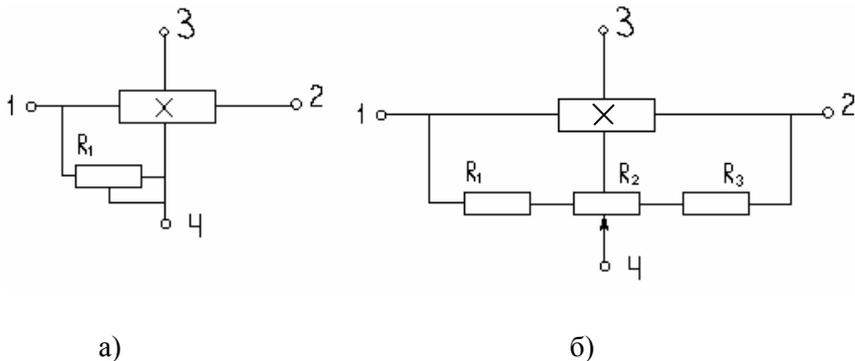


Рис. 4.18.

одного знака, а на рис. 4.18, б – двух знаков.

Основная погрешность приборов с ПХ составляет  $0,5 \div 1\%$  и более.

При сложной коррекции и в узком температурном диапазоне можно получить погрешность  $0,1 \div 0,2\%$ .

Если датчик Холла поместить в неоднородное магнитное поле и перемещать в нем, то, измеряя изменение ЭДС Холла, можно определить перемещение датчика. По литературным данным при градиенте индукции  $10$  Гс/см наблюдают достоверное перемещение в единицы ангстрем [5].

Использование р-п-переходов для измерения давлений основано на том, что их вольт-амперная характеристика изменяется под действием приложенного давления, то есть электрическое

сопротивление перехода при определенном электрическом смещении является функцией давления. На рис. 4.19 приведены характеристики ненагруженного (давление  $p=0$ ) и одноосно нагруженного диода ( $p \neq 0$ ).

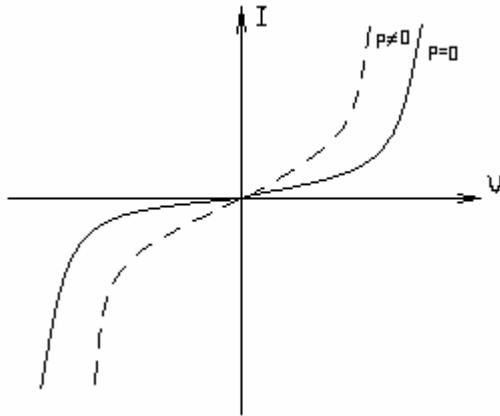


Рис. 4.19.

При изменении давления от 140 атм до 420 атм ток в прямом направлении изменяется на четыре порядка.

Основные достоинства измерительных преобразователей на р-п-переходах заключаются в их очень высокой тензочувствительности:  $K_v = (\Delta R/R)/S_v$ , где  $\Delta R/R$  – относительное изменение сопротивления;  $S_v = \Delta P/B$  – относительное изменение объема;  $\Delta P$  – изменение всестороннего (гидростатического) давления;  $B$  – модуль объёмной упругости материала, который может находиться в диапазоне от  $2 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^4$ .

*Струнные датчики* строятся на использовании зависимости частоты  $f_0$  собственных колебаний струны от механического

натяжения струны под действием силы  $F$ :  $f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{Sd}}$ , где  $l$  – длина струны;  $S$  – ее поперечное сечение;  $d$  – плотность материала.

Под воздействием механического напряжения  $F/S$  струна удлиняется на величину  $\Delta l$ , причем  $\Delta l/l = F/(YS)$ , где  $Y$  – модуль

Юнга материала струны. Тогда выражение для частоты  $f_0$  можно записать, как деформацию  $\Delta l/l$ :

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Y \Delta l}{d l}} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{4l^2 d}{Y} f_0^2 = K f_0^2.$$

Если  $\Delta l_0$  – начальное удлинение струны, а  $f_0$  – соответствующая ему частота,  $\Delta l_1$  и  $f_1$  – соответствующие величины после деформаций, то удлинение струны, соответствующее деформации, равно:  $\Delta l = \Delta l_1 - \Delta l_0$  или  $\frac{\Delta l}{l} = K(f_1^2 - f_0^2)$ . Зная  $f_0$  и измеряя  $f_1$ , можно определить деформацию конструкции.

На рис. 4.20 показан генератор с колеблющейся струной. На входе и выходе усилителя включены катушки, которые обеспечивают положительную обратную связь через колеблющуюся струну, образуя генератор на частоте ее собственных колебаний  $f$ .

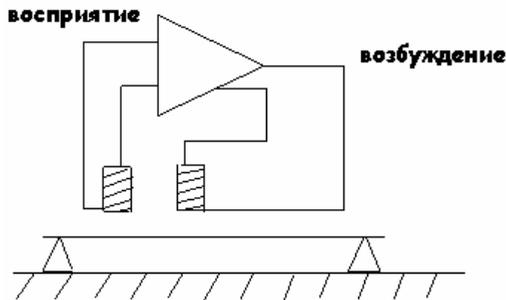


Рис. 4.20.

Такой тип измерителя применяется, главным образом, в строительстве. Например, струнный датчик фирмы «Телемак» имеет следующие характеристики:  $f_{\max} = 1200$  Гц,  $f_{\min} = 400$  Гц, диапазон измерения – 4000 мкм/м, разрешение – 1 мкм/м, точность –  $1 \div 2$  %, масса – 1 кг.

*Пьезоэлектрические преобразователи* являются одними из наиболее перспективных датчиков механических величин. Пьезоэлектрическими называются кристаллы и текстуры, электризующиеся под действием механических напряжений

(прямой пьезоэффект) и деформирующиеся в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект обладает знакочувствительностью, т. е. происходит изменение знаков заряда при замене сжатия растяжением и изменение знака деформации при изменении направления электрического поля.

Пьезоэффектом обладают кристаллы (кварц, турмалин, ниобат лития, сегнетова соль и др.) и искусственные пьезокерамики (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.).

Рассмотрим физическую природу пьезоэлектричества на примере кварца. Кристалл кварца имеет форму призмы с пирамидальными концами и гексагональным поперечным сечением (рис. 4.21). На рисунке:  $X$  – электрическая ось;  $Y$  – механическая ось;  $Z$  – оптическая ось, перпендикулярная плоскости  $XY$ . Векторы

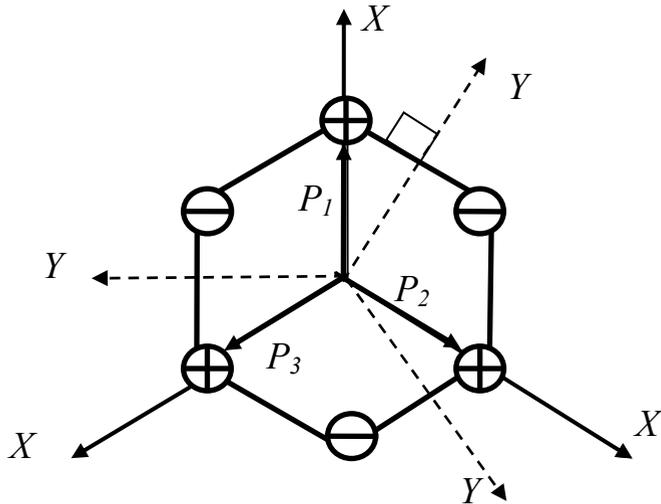


Рис. 4.21.

поляризации  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  равны и в сумме дают 0. Кристалл нейтрален.

Если приложить силу  $F_x$  вдоль оси  $X$ , то кристалл деформируется, как показано на рис. 4.22. При этом сумма проекций векторов  $P_2$  и  $P_3$  на ось  $X$  будет меньше вектора  $P_1$  (его величина не изменится) и, следовательно, появится равнодействующая вектора поляризации, которой соответствуют

поляризационные заряды на гранях. При растяжении знаки зарядов изменятся на противоположные. Из рисунка видно, что электрическое состояние ячейки вдоль оси  $Y$  не изменилось.

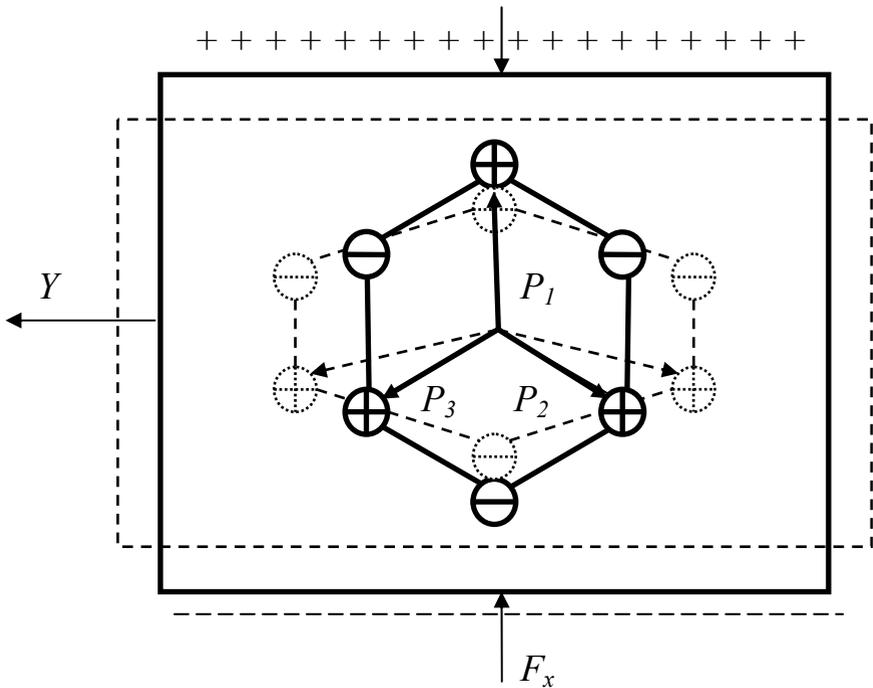


Рис. 4.22.

При механических напряжениях вдоль оси  $Y$  (рис. 4.23) сумма проекций векторов  $P_2$  и  $P_3$  на ось  $Y$  остается равной 0, и на гранях пьезоэлемента, перпендикулярных оси  $Y$ , зарядов не возникает.

Сумма проекций  $P_2$  и  $P_3$  на ось  $X$  не равна  $P_1$ , и на гранях, перпендикулярных оси  $X$ , возникают заряды, как показано на рис. 4.23.

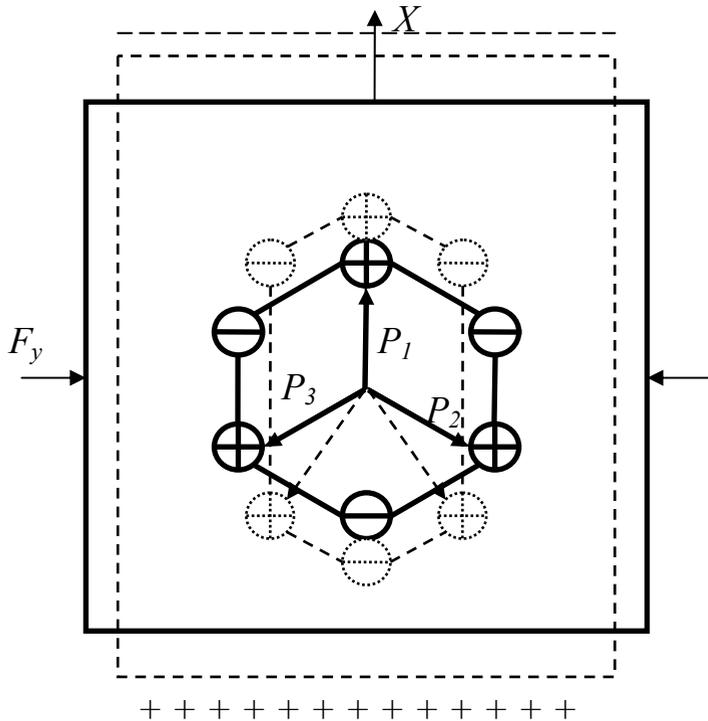


Рис. 4.23.

Эффект образования зарядов на гранях, перпендикулярных нагружаемым, называется поперечным пьезоэффектом.

При нагружении кристалла равномерно со всех сторон (гидростатическое сжатие) или вдоль оси  $Z$  кристалл остается электрически нейтральным.

При механическом напряжении сдвига, как показано на рис. 4.24, заряды возникают на гранях перпендикулярных  $Y$ , т. к.  $\Delta P_{3y}$  не равно  $\Delta P_{2y}$ , а  $\Delta P_{3x} = \Delta P_{2x}$ , где  $\Delta P_{3y}$  – проекция вектора  $P_3$  на ось  $Y$  и т. п.

Наличие полярных направлений в пьезоэлектриках объясняет важность определенной ориентации граней пьезоэлемента относительно кристаллографических осей кристалла X, Y и Z.

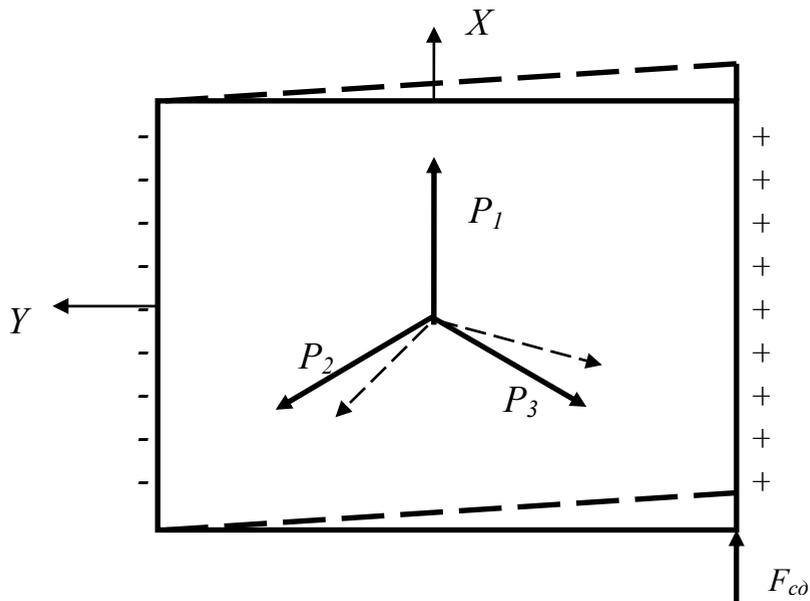


Рис. 4.24.

Возможные варианты срезов показаны на рис. 4.25. Для X, Y, Z-срезов механические напряжения на гранях совпадают по направлению с кристаллографическими осями.

При построении пьезоэлектрических датчиков используются резонансные свойства пьезоэлектрической пластины.

*Пьезорезонансные преобразователи.* В пьезоэлектрическом резонаторе происходит преобразование электрического напряжения между электродами в деформацию и механические напряжения в пьезоэлементе, которые вызывают ответную реакцию по выходу в виде зарядов на электродах.

Обратимость пьезоэлектрического эффекта позволяет выполнять резонатор в виде двухполюсника, объединяющего системы электрического возбуждения механических колебаний и съема электрического сигнала. Резонансные колебания в пьезоэлементе возникают в результате установления в нем стоячих ультразвуковых волн. Если на отрезке между гранями укладывается целое число полуволн, то в пьезоэлементе устанавливаются стоячие волны.

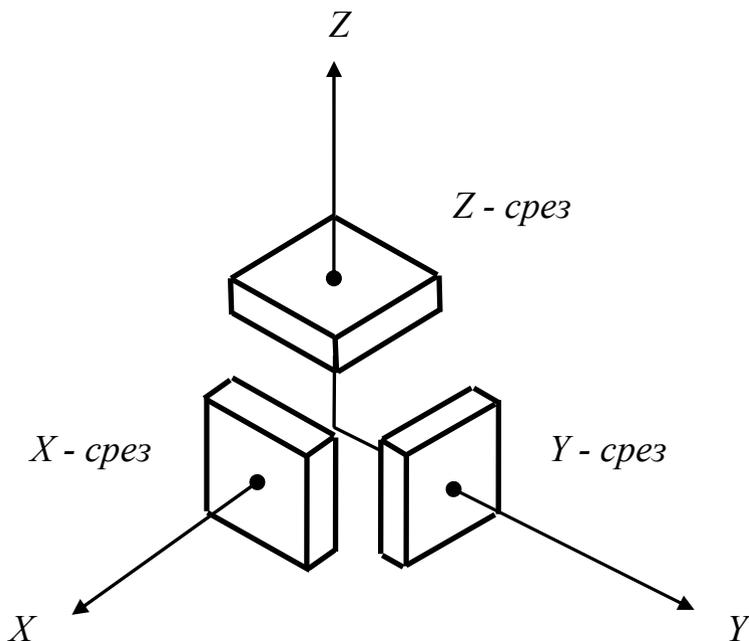


Рис. 4.25.

Основой пьезорезонансного датчика является пьезорезонатор, резонансная частота которого изменяется под действием измеряемой величины.

Тензочувствительные пьезорезонансные датчики (ПРД) представляют собой преобразователи механических воздействий

(усилий, давлений, перемещений и т. д.) в изменения резонансной частоты  $f_p$ , которая определяется выражением:  $f_p = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{c}{\rho}}$ ,

где  $c$  – коэффициент упругости;  $l$  – размер;  $\rho$  – плотность;  $n$  – количество полуволн на размере  $l$ .

Относительное изменение частоты, вызванное изменением параметров  $\rho$ ,  $l$  и  $c$ , равно:  $\Delta f/f_p = -\Delta l/l + \Delta c/c - \Delta \rho/\rho$ . Это выражение тем точнее, чем меньше относительные приращения.

При построении ПРД используются в основном два типа механически перестраиваемых пьезорезонаторов: низкочастотные с резонаторами-пластинами, совершающими колебания изгиба; высокочастотные с резонаторами-пластинами, совершающими колебания сдвига по толщине.

Низкочастотные пьезорезонаторы обладают высокой чувствительностью к механическим воздействиям в диапазоне изменения  $\Delta f/f_p = 10\div 20\%$ , но имеют высокую нелинейность – до 20%. Для высокочастотных –  $\Delta f/f_p$  и нелинейность составляют доли процента.

Тензочувствительные ПРД в настоящее время применяются для измерения усилий, деформаций, ускорений, давлений и др.

Высокочастотные пьезорезонаторы выполняются в виде пластин (рис. 4.26, а, в) или линз (рис. 4.26, б, д) с электродами в

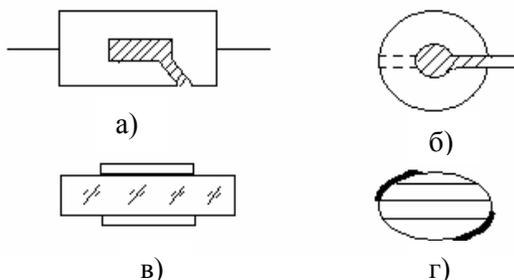


Рис. 4.26.

центральной части.

Внешние механические воздействия подводятся к торцам пластины, при этом добротность системы практически не отличается от добротности свободного пьезорезонатора, так как

колебательная энергия локализуется в подэлектродной области резонатора.

Перестройка частоты пропорциональна величине создаваемых в этой области напряжений  $\sigma$ :  $\Delta f/f_p = k\sigma$ , где  $k = \text{const}$ .

### 4.3. Тахометрические датчики

Тахометрические датчики в своем большинстве являются датчиками угловой скорости. В случае прямолинейного движения измерение скорости часто также можно свести к измерению скорости вращения.

Промышленные датчики скорости базируются на законе Фарадея  $e = -d\Phi/dt$ . Поэтому всякое относительное перемещение между источником потока и контуром наводит в нем ЭДС, амплитуда которой пропорциональна скорости перемещения. Этот вид тахометрии называется электродинамическим.

Когда тело осуществляет периодическое движение, например вращение, измерение его скорости может быть заменено измерением частоты импульсов (диск на валу с прозрачными и непрозрачными частями). Такие тахометры называются импульсными.

В случае очень медленного вращения упомянутые выше методы не приемлемы. В этом случае измерение скорости может быть осуществлено с помощью лазерного гиromетра, принцип действия которого основан на измерении изменения разности хода лучей в интерферометре.

Тахогенератор (ТГ) постоянного тока является электрической коллекторной машиной постоянного тока, работающей в генераторном режиме. Конструкция ТГ принципиально не отличается от конструкции генератора независимого возбуждения или двигателя постоянного тока и содержит статор, ротор и щеточно-коллекторный контакт (рис. 4.27, а).

При работе на холостом ходу ( $I_n=0$ ) ЭДС якоря  $E_y$  пропорциональна магнитному потоку возбуждения и скорости вращения якоря  $E_y = c\Phi_0\omega = k_{тг0}\omega$ , где  $k_{тг0} = c\Phi_0$ , а  $c$  – конструктивный коэффициент.

При подключении нагрузки со щеток снимается напряжение  $U_{я} = E_{я} - I_{я}R_{ц.я.}$ , где  $I_{я}$  – ток якоря;  $R_{ц.я.}$  – сопротивление цепи якоря (обмотки и щеточно-коллекторного контакта).

Подставляя значение тока якоря  $I_{я} = U_{я}/R_{я}$  в выражение для  $U_{я}$ , получим:

$$U_{я} = E_{я}/(1 + R_{ц.я.}/R_{н}) = \omega k_{тг0}/(1 + R_{ц.я.}/R_{н}) = k_{тг}\omega.$$

На рис. 4.27, б показаны регулировочные характеристики ТГ при различных сопротивлениях нагрузки  $R_{н}$ .

При протекании по обмотке якоря тока  $I_{я}$  возникает реакция якоря, которая уменьшает поток возбуждения до величины  $\Phi = \Phi_0 - \Phi_p$ , где  $\Phi_0$  – магнитный поток возбуждения при  $I_{я}=0$ ,  $\Phi_p = k_p I_{я}$  – размагничивающая составляющая реакции якоря. Тогда  $E_{я} = k\omega(\Phi_0 - \Phi_p)$ .

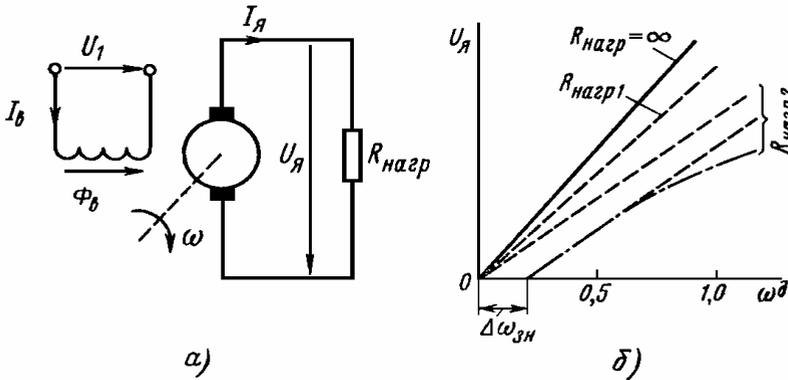


Рис. 4.27.

Сопротивление щеточно-коллекторного контакта зависит от  $I_{я}$ , но падение напряжения на нем  $U_{щ} = \text{const}$ . С учетом этих факторов напряжение, снимаемое с якоря, будет равно:

$$U_{я} = (k_{тг0}\omega - U_{щ})/(1 + (k_p\omega + R_{я})/R_{н}).$$

Характеристика является нелинейной и имеет зону нечувствительности  $\Delta\omega$ , на рисунке показана штрихпунктирной линией.

Если размагничивающим фактором реакции якоря можно пренебречь, то есть принять  $k_p=0$ , то характеристика будет линейной, а  $k_{тг} = dU_{я}/d\omega = k_{тг0}/(1 + R_{я}/R_{н}) = \text{const}$ .

Еще один фактор нестабильности – это изменение потока возбуждения  $\Phi$  из-за нагрева обмоток ( $R_{в}$  увеличивается) или колебаний напряжения возбуждения  $U_{в}$ . Для уменьшения влияния этих факторов магнитную систему ТГ выполняют с большим насыщением. Из рис. 4.28, на котором изображена кривая намагничивания ротора и статора, видно, что из-за одинаковой величины нестабильности  $\Delta H$  изменение индукции  $\Delta B$  (и следовательно  $\Delta \Phi$ ) в насыщенной магнитной системе существенно меньше, чем в ненасыщенной.

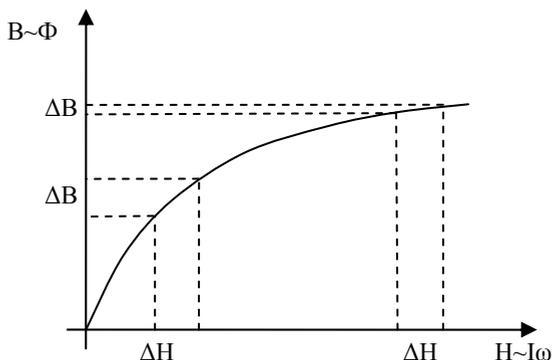


Рис. 4.28.

Недостатком насыщенной магнитной системы является невозможность изменения  $k_{тг}$  за счет изменения тока возбуждения  $I_{в}$ .

Другим методом стабилизации магнитного потока является

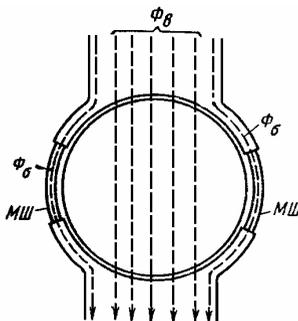


Рис. 4.29.

применение термочувствительных магнитных шунтов (МШ) (рис. 4.29).

При увеличении температуры магнитное сопротивление шунтов увеличивается, и магнитный поток все более будет замыкаться через якорь, компенсируя уменьшение потока за счет разогрева обмоток возбуждения.

Можно получать поток возбуждения от постоянных магнитов. При этом устраняются причины указанных нестабильностей, но в этом случае нельзя изменять  $k_{\Gamma}$ .

Асимметрия характеристики возникает из-за неточной установки щеток на геометрической нейтрали (рис. 4.30, а). Это приводит к тому, что продольная составляющая реакции якоря меняет знак при изменении направления вращения. Поток возбуждения в одном случае ослабляется, а в другом – усиливается (рис. 4.30, б). На рисунке  $\Phi_{\text{рч}}$  – реакция якоря при вращении по часовой стрелке,  $\Phi_{\text{рп}}$  – против.

Коэффициент асимметрии определяется выражением:

$$A = \frac{2 \cdot (U_{\text{яч}} - U_{\text{яп}}) \cdot 100\%}{U_{\text{яч}} + U_{\text{яп}}},$$

где  $U_{\text{яч}}$ ,  $U_{\text{яп}}$  – напряжение на якоре при вращении по часовой стрелке и против. Допустимое значение  $A$  составляет  $0,3 \div 1\%$ .

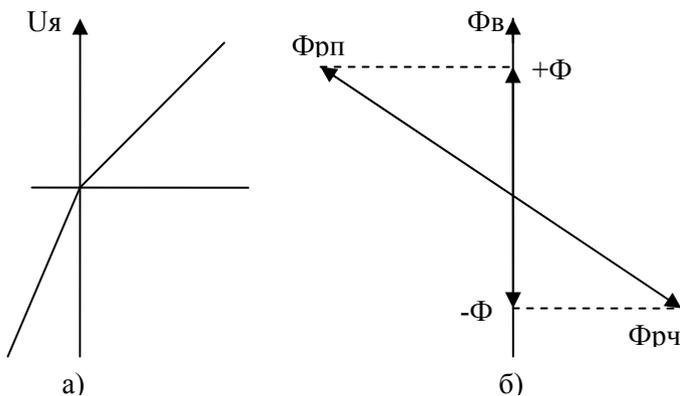


Рис. 4.30.

Конструктивно ТГ выполняются с роторами трех типов: катушечными, полыми и дискоидальными роторами.

ТГ с катушечными роторами имеют  $U_{\text{вых}}$  в несколько десятков вольт, но большая реакция якоря искажает характеристику, а большая индуктивность ухудшает быстродействие.

Полый ротор образуется проволочной обмоткой на полем немагнитном цилиндре, вращающемся вокруг неподвижного сердечника.

Дискоидальные роторы выполняются по технологии печатных плат.

Полый и дискоидальный ротор характеризуются малым  $U_{\text{вых}}$ , но имеют малую реакцию якоря и индуктивность.

Достоинствами ТГ постоянного тока являются: отсутствие влияния фазного угла нагрузки  $\varphi_n$  на  $U_y$  и высокая линейность характеристики.

К недостаткам можно отнести недолговечность скользящего контакта, радиопомехи из-за искрения под щетками, коллекторный шум выходного напряжения, сложность конструкции и, следовательно, высокую стоимость.

*Тахогенератор переменного тока* не имеет щеточно-коллекторного контакта и соответствующих ему недостатков.

Асинхронный ТГ подобен по конструкции двухфазному асинхронному двигателю с полым ротором. Ротор представляет

собой немагнитный полый цилиндр. Обмотки статора расположены под углом  $90^\circ$  (рис. 4.31).

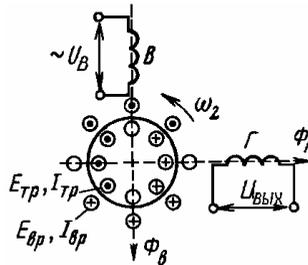


Рис. 4.31.

На обмотку возбуждения подается переменное напряжение  $U_B$  с частотой  $\omega_c$ . С другой обмотки снимается сигнал  $U_{\text{вых}} = k\omega U_B \cos(\omega_c t + \varphi)$ , где  $k$  – конструктивный коэффициент.

Сдвиг фазы  $\varphi$  меняется на несколько градусов во всем диапазоне изменения скоростей и испытывает скачок на  $\pi$  при смене направления вращения. При нулевой скорости  $U_{\text{вых}} \neq 0$  из-за несовершенства конструкции.

Характеристики: диапазон измерений – от 10 об/мин до  $2 \cdot 10^4$  об/мин;  $U_{\text{вых}}$  при 1000 об/мин – от 1 до 10 В; линейность характеристики – от 0,1 % до 0,2 % от диапазона измерения;  $U_{\text{ост}} = 10 \div 100$  мВ. Момент инерции ротора – несколько  $\Gamma \text{см}^2$ .

*Синхронный ТГ* работает по принципу однофазного синхронного генератора. Конструкция показана на рис. 4.32.

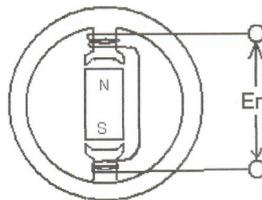


Рис. 4.32.

Выходное напряжение  $E_r \sim \omega$ . Индуктивное сопротивление выходной обмотки также  $\sim \omega$ , поэтому линейность характеристики  $E_r = f(\omega)$  невелика. Синхронные ТГ используются для

непосредственного измерения скорости вращения механизмов. Они работают на вольтметр, проградуированный в единицах угловой скорости. Скорость вращения можно определять также по частоте выходного сигнала.

*Электромагнитные тахометры линейной скорости.* Когда перемещение значительно, линейную скорость можно определить путем измерения угловой скорости ролика или другой вращающейся детали того же устройства. Так скорость стального листа прокатного станка определяется скоростью вращения валков.

В случае малых перемещений датчик скорости изготавливается из магнита и катушки. Их относительное перемещение наводит в катушке ЭДС, пропорциональную скорости. На рис. 4.33 показана конструкция с подвижной катушкой.

Максимальное перемещение для таких конструкций составляет несколько миллиметров, чувствительность – порядка одного вольта на метр в секунду, линейность – около  $\pm 10\%$ .

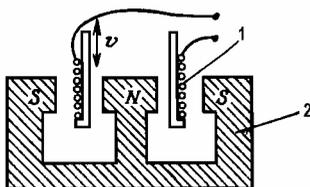


Рис. 4.33.

Для более значительных перемещений (до 0,5м) используют магнит, который перемещается вдоль оси двух катушек (рис. 4.34). ЭДС, наведенная в катушке перемещением магнита, пропорциональна его скорости.

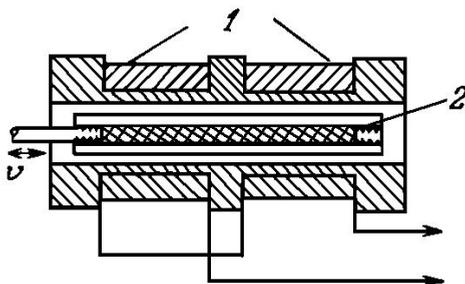


Рис. 4.34.

Катушки включены встречно, и в них наводятся ЭДС разных знаков, при движении магнита ЭДС суммируются.

Примером может служить датчик линейной скорости 7L20VT.Z (фирма Schaevitz). Он имеет максимальный ход 500 мм, чувствительность 4,8 мВ/мм/с и линейность  $\pm 1\%$ .

*Импульсные тахометры угловой скорости.* Если на вращающемся валу имеется диск, на котором периодически расположены метки (отверстия, зубцы и т. п.), то датчик при прохождении этих меток выдает импульсный сигнал, частота которого равна  $f = pN$  Гц, где  $p$  – число меток на диске,  $N$  – число оборотов в секунду.

Устройством формирования сигнала, пропорционального скорости вращения, служит либо цифровой частотомер, либо преобразователь частота – напряжение, который состоит из формирователя импульсов постоянной амплитуды и длительности и фильтра низких частот, выделяющего составляющую сигнала, равную среднему значению напряжения импульсов, пропорциональную частоте импульсов и, следовательно, угловой скорости.

*Датчики с переменным магнитным сопротивлением.*  
Измерительная катушка имеет магнитный сердечник (2), на который воздействует магнитный поток от постоянного магнита (1). Катушка помещена перед вращающимся ферромагнитным телом, так что происходит периодическое изменение магнитного сопротивления в цепи катушки (рис. 4.35).

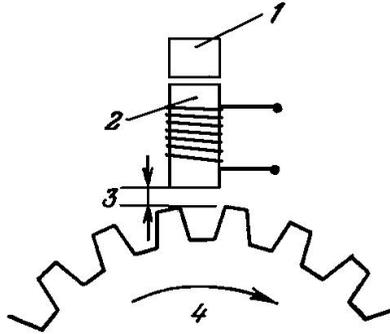


Рис. 4.35.

Изменение магнитного потока наводит в катушке ЭДС с частотой, пропорциональной скорости вращения. Амплитуда ЭДС зависит от скорости вращения детали и при малых скоростях может быть недостаточной для обнаружения.

Типичные диапазоны измерений составляют от 50 до 500 об/мин для колеса с 60 зубьями и от 500 до 10000 об/мин для колеса с 15 зубьями.

Датчик подобного типа позволяет также определить скорость вращения колеса внутри немагнитного кожуха.

*Датчики на токах Фуко.* Этот тип датчика используется в том случае, когда вращающееся тело металлическое, но не магнитное. Катушка при приближении металлического тела изменяет  $L$  и  $R$ . Катушка включена в резонансный контур синусоидального генератора. При изменении ее характеристик генерация колебаний прекращается. Это происходит при прохождении каждого зуба перед катушкой. Число таких прерываний легко посчитать.

Преимуществом такого датчика является то, что амплитуда сигнала не зависит от скорости вращения детали и, следовательно, его можно применять для измерения очень малых скоростей.

*Оптический тахометр* состоит из источника света, фотоприемника и диска с отверстиями (или отражающими элементами) (рис. 4.36).

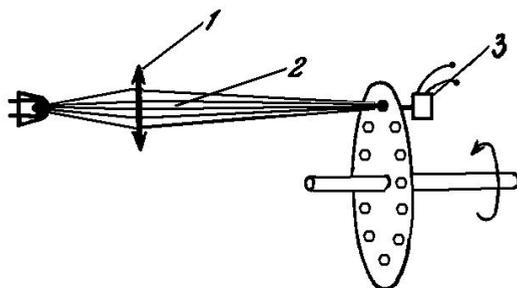


Рис. 4.36.

При вращении диска фотодатчик 3 выдает электрические импульсы, частота которых пропорциональна скорости вращения. Обработка сигнала не отличается от описанного выше.

*Гиromетры.* Гиromетры – это приборы, устанавливаемые на движущихся объектах для определения их угловой скорости. В зависимости от природы используемого физического явления различают:

а) механические гиromетры, основанные на свойствах гироскопа;

б) оптические гиromетры на лазерах или волоконной оптике, использующие свойства распространения волн.

*Гироскопический измеритель скорости.* Гироскоп состоит из ротора, смонтированного в кардановом подвесе, который вращается вокруг оси  $YY'$  с высокой скоростью ( $\sim 10^4$  об/мин) (рис. 4.37).

Измеряемая скорость вращения  $\omega$  направлена по оси  $ZZ'$ . Из-за нее возникает гироскопический момент сил, пропорциональный  $\omega$  и направленный по оси  $XX'$ . Он стремится повернуть подвес гироскопа. Гироскопический момент уравнивается моментом упругих сил, создаваемым двумя пружинами; он пропорционален углу  $\alpha$  поворота подвеса. Таким образом, в условиях равновесия угол поворота  $\alpha$  пропорционален измеряемой скорости  $\omega$ . С помощью датчика (например потенциометра) угол  $\alpha$  преобразуется в электрический сигнал.

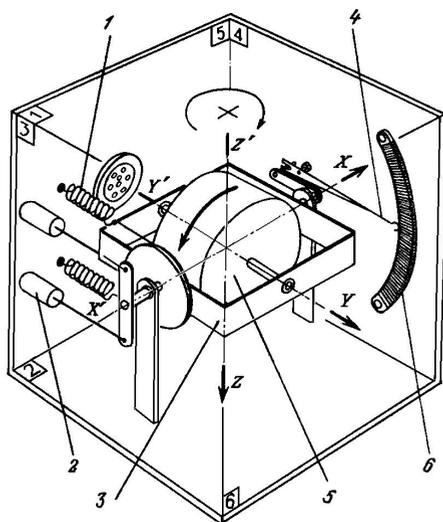


Рис. 4.37.

Характеристики типового гироскопического измерителя скорости: диапазон измерений – от  $\pm 7$  град. в сек. до  $\pm 360$  град. в сек.; отклонение от линейности  $\pm 1,5$  % от диапазона измерений; порог чувствительности  $\pm 1$  % от диапазона измерений; ошибка измерения –  $0,5$  % от диапазона измерений; собственная резонансная частота – между 6 и 25 Гц.

*Оптические гиromетры.* Когда световая волна распространяется в движущейся среде, преодолеваемое ею расстояние зависит от направления движения среды (рис. 4.38).

Пусть между зеркалами M1 и M2 расстояние равно  $d$ . Тогда при неподвижных зеркалах ( $V=0$ ) свет проходит от M1 до M2 расстояние  $d_{12}$  и от M2 до M1 расстояние  $d_{21}$ , которые равны  $d_{12}=d_{21}=d$ . Если оба зеркала движутся со скоростью  $V$ , то расстояние  $d_{12}=d(1+V/c)$ , а  $d_{21}=d(1-V/c)$ . Разность  $d_{12}-d_{21}=2d(V/c)$  пропорциональна скорости  $V$ .

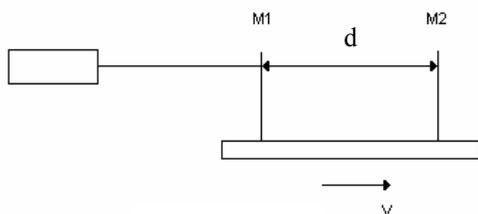


Рис. 4.38.

На рис. 4.39 показана конструкция оптического гиromетра.

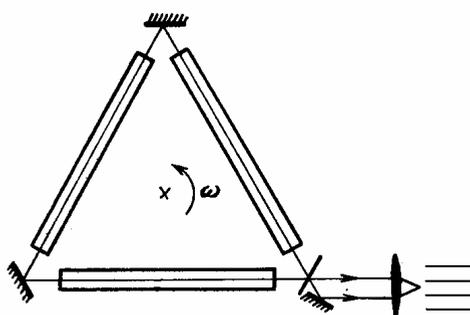


Рис. 4.39.

Во вращающейся среде, образующей кольцевой резонатор лазера, две волны распространяются в противоположных направлениях и создают эффект разности хода, проявляющийся в двух пучках различной частоты. Суперпозиция этих пучков порождает биение, частота которого  $\Delta f$  пропорциональна скорости вращения  $\omega$ . Такой прибор позволяет измерить очень малые угловые скорости, порядка  $10^{-2}$  градусов в час.

В другом гиromетре (рис. 4.40) два пучка от одного лазера распространяются в противоположных направлениях по оптическому волокну, вращающемуся с измеряемой скоростью  $\omega$ .

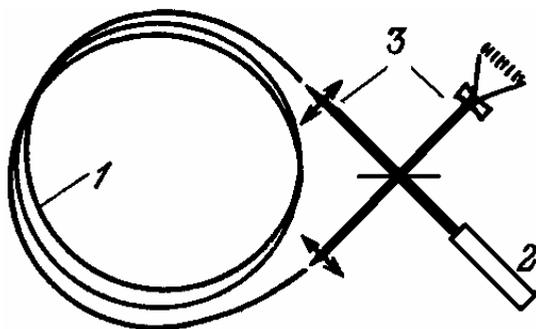


Рис. 4.40.

На выходе из стекловолокна два пучка интерферируют. Подсчет числа  $\Delta z$  смещенных из-за вращения полос позволяет измерить скорость вращения  $\omega$ .

В гироскопах этого типа можно увеличить длину  $h$  стекловолокна при многовитковой намотке. Это позволяет измерять угловые скорости в 100 раз меньше, чем при использовании лазерного гироскопа по схеме рис. 4.39.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как работают потенциометрические датчики перемещений?
2. Как работают индуктивные датчики перемещений? Назовите их конструктивные разновидности.
3. Какие электрические машины используются для измерения угловых перемещений?
4. Каков принцип действия индуктосина?
5. Назовите принцип действия оптических датчиков перемещения.
6. Каковы конструктивные особенности емкостных датчиков перемещения?
7. Что такое деформация? Чем она отличается от перемещения?
8. Назовите тензодатчики, принцип действия которых основан на изменении сопротивления.

9. В чем заключается эффект Холла и как его можно использовать для измерения малых перемещений?

10. Где используются струнные датчики?

11. Что такое пьезорезонансный датчик и как он используется для измерения усилий, деформаций и др.?

12. Каков принцип действия тахогенератора постоянного тока?

13. Каков принцип действия тахогенератора переменного тока?

14. На каком принципе работают электромагнитные тахометры линейной скорости?

15. На каком принципе работают импульсные тахометры угловой скорости?

16. Что такое гироскоп и как он используется для измерения угловой скорости?

17. Назовите принцип действия оптического гироскопа.

## **5. ДАТЧИКИ ГИДРО - ПНЕВМОСТАТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Измерение расхода жидкостей и газов требуется в различных отраслях науки и хозяйства. Расход – это количество жидкости или газа, проходящее через некоторое сечение трубы за единицу времени. При ламинарном течении измерение расхода часто производится с помощью определения скорости потока жидкости или газа и наоборот. Требования, предъявляемые к датчикам расхода, самые разнообразные. Это высокие давления, широкий диапазон температур, высокие точности измерения и др.

Измеритель расхода называется расходомером, измеритель скорости – анемометром.

В настоящее время используются расходомеры следующих типов: расходомеры постоянных и переменных давлений; трубные и вихревые; электромагнитные; тепловые; акустические; ядерно-резонансные; оптические; струйные.

Расходомеры постоянного и переменного давления позволяют судить о расходе по давлению. Все остальные измеряют скорость потока в одной или нескольких точках профиля скоростей. При измерении скоростей важно использовать бесконтактные измерители, которые не возмущают поле измеряемого параметра. В качестве бесконтактных измерителей скорости и расхода используют оптические, акустические и тепловые.

### **5.1. Расходомеры с сужающими устройствами**

Расходомеры такого типа работают на принципе измерения разности давлений. В основе их принципа действия лежит уравнение Бернулли, согласно которому сумма гидростатического и скоростного напора для одной геодезической высоты неизменна для любой точки потока с учетом потери давления на участке между потоками. Т. е. если сопоставляются две точки потока, то для точки, расположенной дальше по течению, необходимо учитывать потерю давления на участке между потоками из-за трения.

Гидростатический напор эквивалентен высоте, на которую поднялся бы столб жидкости в открытой трубе под действием статического давления (скорость жидкости равна нулю).

Скоростной напор эквивалентен высоте, падая с которой поток приобретает данную скорость. Измерение расхода, основанное на этом принципе, осуществляется путем измерения скорости потока. Это достигается изменением поперечного сечения потока с помощью стандартизированных сужающих устройств, к которым относятся диафрагмы (рис. 5.1 а), сопла (рис. 5.1 б), трубки Вентури (рис. 5.1 в), Долла (рис. 5.1 г) и др.

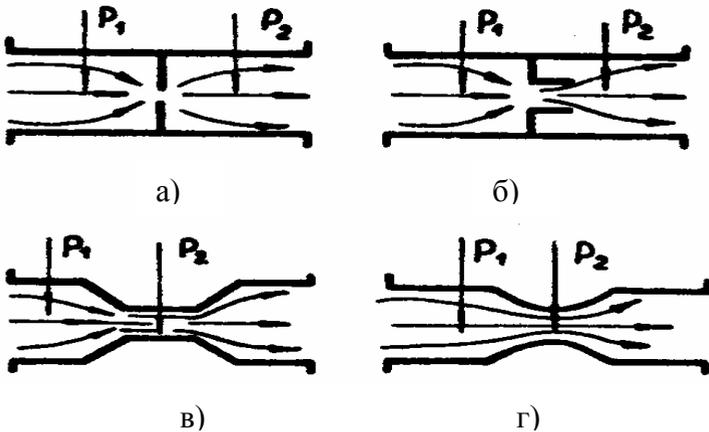


Рис. 5.1.

Давление перед сужающим устройством растёт, а после него падает. На основании уравнения Бернулли можно получить

соотношение  $Q = k \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}}$ , где  $Q$  – расход;  $\Delta P$  – перепад давления;

$k$  – коэффициент, зависящий от формы сужения и характеристики среды;  $\gamma$  – плотность среды.

Расходомеры переменного давления используют зависимость  $Q=f(\Delta P)$ , которая, как видно из соотношения, является нелинейной.

*Расходомер постоянного давления* (рис. 5.2) позволяет получить линейную характеристику  $Q=f(k)$  при  $\Delta P=\text{const}$ . В этих устройствах изменяется сечение сужения (коэффициент  $k$ ), а перепад давлений поддерживается постоянным за счет поплавка. Положение поплавка измеряется и градуируется в значениях расхода  $Q$ . На поплавке имеется спиральная нарезка для придания ему вращения (рис. 5.2, а).

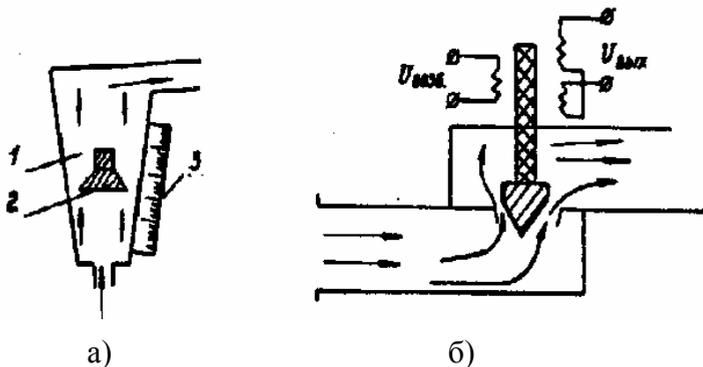


Рис. 5.2.

Такие расходомеры с переменной площадью проходного сечения называются ротаметрами. В ротаметре, изображенном на рис. 5.2, а, положение поплавка измеряется с помощью шкалы, а в ротаметре на рис. 5.2, б – с помощью дифференциально-трансформаторного датчика положения. Обычно погрешность ротаметров составляет  $\pm 2\%$  в диапазоне изменений расхода 10:1.

*Расходомер с лопастью* (рис. 5.3). На лопасть 2 действуют аэро- или гидродинамическая сила потока, сила веса и пружины 1 (если необходимо). Положение равновесия лопасти зависит от расхода. Положение лопасти можно измерить, например, с помощью потенциометра, закрепленного на ее оси.

Статическая характеристика может быть линейной или нелинейной в зависимости от формы трубопровода. Достоинства такого датчика: простота, надежность и низкая стоимость.

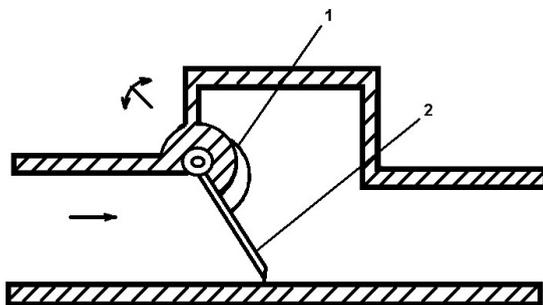


Рис. 5.3.

## 5.2. Турбинные и вихревые расходомеры

Основной частью турбинного расходомера является ротор с лопастями 1, помещенный в поток (рис. 5.4). Угловая скорость ротора пропорциональна скорости потока, которая в свою очередь пропорциональна расходу. На оси ротора находится постоянный магнит 2, который наводит импульсы в катушке 3. По частоте импульсов можно судить о скорости потока или его расходе.

Турбинный расходомер имеет линейную статическую характеристику (1:0,5%) и высокую производительность (до 0,2%).

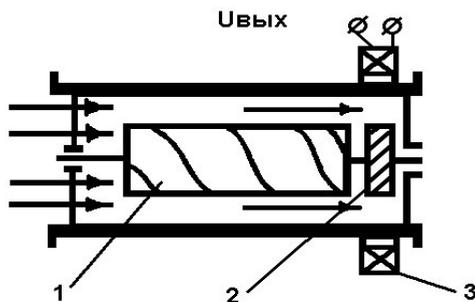


Рис. 5.4.

Диапазон измеряемых расходов не менее 10:1. Показания прибора мало зависят от температуры, плотности и давления среды.

Недостатки: влияние вязкости на точность работы и износ подвижных частей.

*Вихревые расходомеры.* Если поместить поперек потока цилиндрический стержень, то за ним при определенной скорости  $U$  образуются вихри, поочередно с каждой стороны (рис. 5.5). Частота их следования прямо пропорциональна скорости потока.

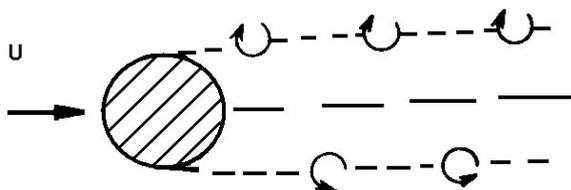


Рис. 5.5.

Измерение частоты следования вихрей можно осуществить с помощью емкостных датчиков давления, помещенных по обе стороны препятствия, либо с помощью нагретых нитей, помещенных в среде за препятствием.

Достоинствами таких приборов являются: широкий диапазон измерения (30:1); хорошая линейность характеристики (1%); статическая характеристика не зависит от вязкости, плотности, давления и температуры; стабильность во времени; нет подвижных частей; можно использовать для измерений в жидкостях и газах с одинаковой точностью.

Недостатком таких датчиков является то, что могут возникнуть неустойчивости, связанные с трехмерностью течения. Для стабилизации используются специальные препятствия в потоке.

*Расходомер с осевым вихрем* основан на генерации колеблющихся вихрей с помощью насадки на входе в прибор (рис. 5.6).

Частота колебаний закрученной жидкости пропорциональна расходу. Эту частоту можно измерить с помощью температурного датчика. Диапазон измерения расхода жидкостей  $6 \cdot 10^{-4} \div 2 \text{ м}^3/\text{с}$ , а газов –  $10^{-4} \div 3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Точность метода  $\pm 1\%$ . Пределы измерения одним прибором – 10:1.

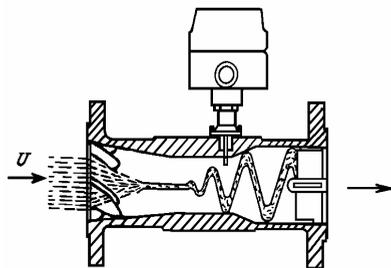


Рис. 5.6.

### 5.3. Электромагнитные расходомеры

В основе работы лежит эффект Фарадея, заключающийся в индуцировании электрического поля в движущемся потоке проводящей жидкости, находящейся в магнитном поле. Величина ЭДС пропорциональна скорости движения жидкости и следовательно расходу.

Если рассмотреть проводник длиной  $l$ , движущийся в магнитном поле с индукцией  $B$  со скоростью  $V$ , как показано на рис. 5.7, то при взаимоперпендикулярных  $B, l$  и  $V$  в нем возникает ЭДС  $e = BlV$ .

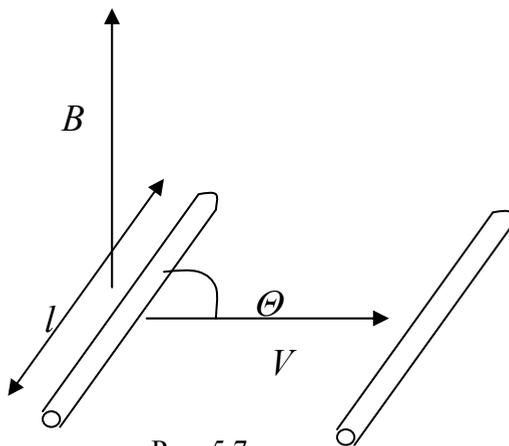


Рис. 5.7.

Эта формула распространяется на случай течения жидкости в трубопроводе диаметром  $D$  со скоростью  $v$ , перпендикулярной  $B$ . Индуцированная ЭДС вдоль диаметра, перпендикулярного  $B$  и  $V$ , выражается формулой  $e = BDV$ .

В действительности скорость изменяется вдоль радиуса поперечного сечения, но так как распределение скорости симметрично относительно оси трубопровода, то измеренная таким образом скорость  $v$  является средней скоростью течения, а ЭДС – пропорциональна расходу.

Участок трубы, где расположен датчик, изготовлен из немагнитного материала с изолированными от трубы электродами для съема ЭДС. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны оси трубы (рис. 5.8).

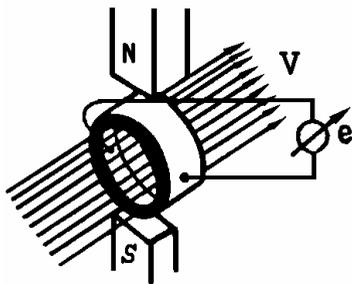


Рис. 5.8.

Если измерительное устройство имеет высокое входное сопротивление, то индуцированная ЭДС практически не зависит от физических свойств движущегося проводящего потока в широком диапазоне изменения электропроводности и определяется в основном скоростью потока, индукцией магнитного поля и расстоянием между электродами.

При использовании постоянного магнитного поля в силу электрохимических эффектов происходит поляризация электродов, что приводит к возникновению паразитной разности потенциалов. Эффект поляризации отсутствует в жидких металлах, обладающих высокой электропроводностью. При этом сигнал снимается с наружной стенки трубопровода, изоляционное покрытие отсутствует.

В подавляющем большинстве электромагнитных расходомеров применяется переменное магнитное поле, когда влияние поляризации отсутствует.

Электромагнитные измерители скорости и расхода могут быть использованы в широком диапазоне скоростей: от 1 см/с до 410 м/с. Электромагнитные расходомеры малоинерционны, потери давления ничтожны. Диапазон измерения скорости на 1 датчик составляет 100:1. Статическая характеристика линейна; точность – доли процента. В датчике отсутствуют подвижные части; измерение не зависит от физических свойств жидкости (плотности, вязкости, удельной проводимости – при условии, что она выше некоторой минимальной величины порядка нескольких мкСм/см).

#### 5.4. Тепловые измерители скорости и расхода

Можно выделить 2 типа тепловых расходомеров: классические термоанемометры и измерители со сном закона распределения температуры.

*Термоанемометр* – измеритель скорости по тепловым параметрам. Для измерения скорости потока в него погружают термочувствительные элементы и подогревают их электрическим током до температуры, превышающей окружающую. При этом количество тепла, отбираемого от термодатчиков, пропорционально скорости потока.

В равновесном состоянии мощность, идущая на нагрев термодатчика (проволочки), равна количеству теплотерь  $I^2R=hS(T_d-T_c)$ , где  $I$  – ток через датчик;  $R$  – его сопротивление;  $S$  – эффективная поверхность теплоотдачи;  $T_d$  – температура датчика;  $T_c$  – температура среды;  $h$  – коэффициент теплопередачи.

Коэффициент  $h$  зависит от скорости  $V$  потока:  $h=C_0+C_1V^{1/2}$ , где  $C_0$  и  $C_1$  – константы. Таким образом:  $I^2R=S(C_0+C_1V^{1/2})(T_d-T_c)$ .

В термометрах с нагретой нитью (или лентой) используются измерительные схемы двух типов: схема с постоянным током  $I$  и схема с постоянной температурой  $T_d$ .

*Схема с постоянным током.* Ток  $I$ , протекающий через нить, поддерживается постоянным с помощью либо балластного сопротивления, либо с помощью источника тока.

При изменении скорости потока изменяется и температура нити. Сопротивление нити зависит от ее температуры, поэтому с изменением скорости изменяется напряжение на концах.

Упрощенная схема показана на рис. 5.9.

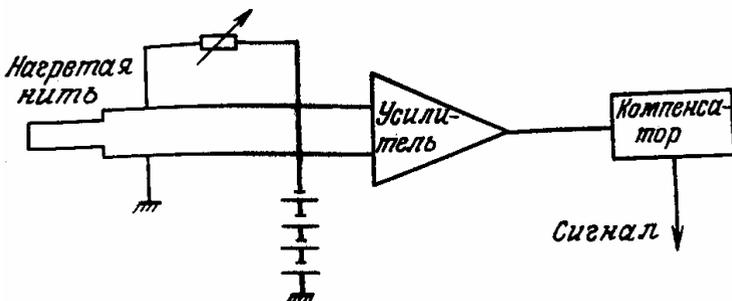


Рис. 5.9.

Нить обладает тепловой инерцией, поэтому для улучшения частотной характеристики в цепь сигнала вводят компенсатор, представляющий собой пропорционально-дифференцирующее звено с постоянной времени, соответствующей тепловой постоянной датчика.

Конструктивно датчик представляет собой тонкую платиновую или вольфрамовую проволоку диаметром  $0,6 \div 10$  мкм, а в жидкостях из соображений прочности чувствительный элемент датчика представляет собой тонкую платиновую ленту, наложенную на изолированный конус или цилиндр, заключенный в кварцевую оболочку.

Рассмотренная схема имеет два недостатка: реакция нити не является линейной, введение дифференцирующего звена повышает уровень помех.

*Схема с постоянной температурой.* В этом случае при изменении скорости потока изменяется ток  $I$  таким образом, чтобы температура датчика и, следовательно, его сопротивление  $R$  оставалась постоянной. Измерительная схема для этого случая показана на рис. 5.10.

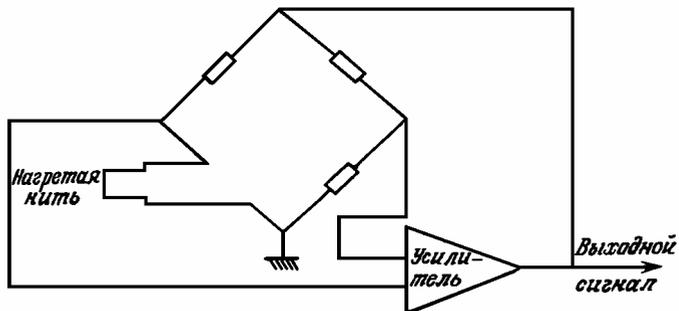


Рис. 5.10.

Датчик является одним из плеч моста. При изменении скорости потока мост разбалансируется, напряжение, снимаемое с диагонали моста, усиливается и изменяет напряжение на другой диагонали моста так, что изменяется ток через датчик, компенсируя тем самым изменение температуры, и температура нити остается постоянной. В этом случае уравнение, связывающее ток  $I$  и скорость потока  $V$ , можно записать так:  $I^2 = C_3 + C_4 V^{1/2}$ , где  $C_3$  и  $C_4$  – константы.

Очевидно, что значение тока  $I$  пропорционально выходному сигналу усилителя. В рассмотренной схеме меньше сказывается тепловая инерция датчика. Нагреваемый проволочный анемометр применяется для измерения потоков газов со скоростью  $0,1 \div 500$  м/с и температурой до  $750^\circ\text{C}$ . Соответствующий диапазон для жидкостей  $0,01 \div 5$  м/с. Для тонкопленочных датчиков, нанесенных на поверхность цилиндра, диапазон измерений составляет  $0,01 \div 25$  м/с с точностью  $\pm 1\%$ .

*Тепловой измеритель массового расхода* состоит из тонкостенной металлической трубки малого диаметра, на внешней поверхности которой намотан проволочный нагреватель, а с противоположных сторон симметрично установлены два датчика температуры (рис. 5.11, а, б).

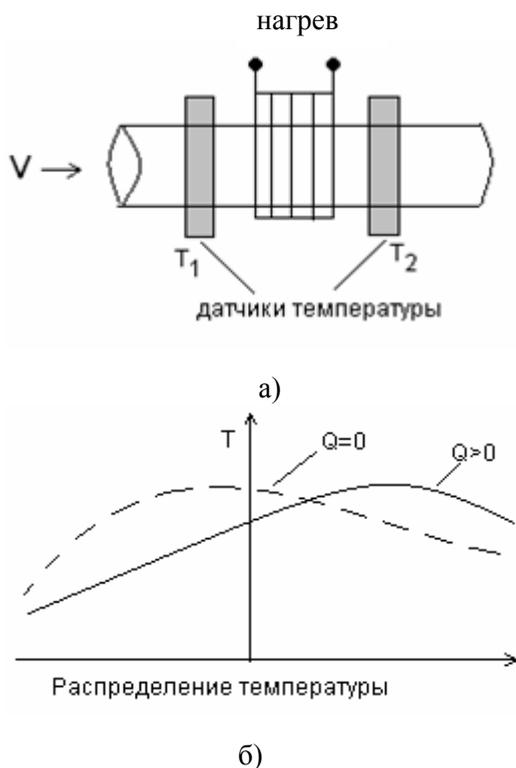


Рис. 5.11.

Когда расход равен 0, нагрев симметричен и  $T_1 = T_2$ , при наличии расхода разность  $\Delta T = T_2 - T_1$  пропорциональна массовому расходу  $Q$ .

Статическая характеристика  $Q = f(\Delta T)$  такого теплового измерителя скорости и расхода имеет нелинейный характер при больших диапазонах измерения.

Тепловой измеритель не чувствителен к изменениям параметров среды. Нагреватель и термодатчики не имеют контакта со средой.

Дифференциальный способ измерения обеспечивает меньшую зависимость от подогрева.

Погрешность современных приборов такого типа – около 1%. Постоянная времени – от 2,5 с до 150 с. Потери напора составляют 2 Па для максимального расхода воздуха при нормальном давлении.

При очень больших расходах датчик устанавливают на байпасе, расход через который составляет постоянную часть от суммарного расхода (рис. 5.12).

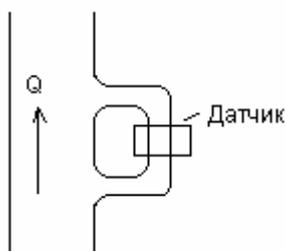


Рис. 5.12.

### 5.5. Чашечные и крыльчатые анемометры (вертушки)

*Чашечный анемометр* состоит из 3 или 4 полусферических чашек, закрепленных с помощью стержней на общей оси (рис. 5.13, а, б).

Находясь в потоке, чашечный анемометр вращается, так как его коэффициент лобового сопротивления имеет разную величину в зависимости от того, на какую сторону чашки набегаёт поток.

Для положения, показанного на рисунке, силы лобового сопротивления, действующие на чашки 1 и 3, соответственно равны:  $F_1 = 1/2\rho C_x S(V - v)^2$ ,  $F_2 = 1/2\rho C_x' S(V + v)^2$ , где  $\rho$  – плотность жидкости;  $C_x$ ,  $C_x'$  – коэффициенты лобового сопротивления для сторон полусферы;  $v$  – линейная скорость чашек;  $V$  – скорость потока.

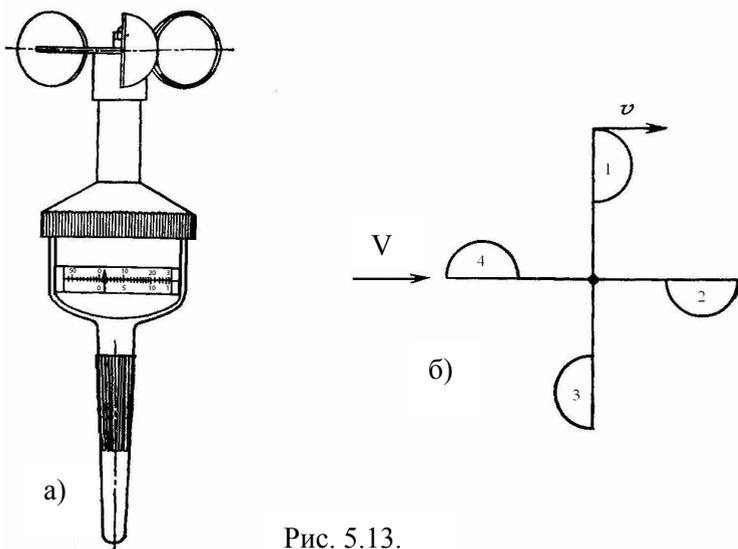


Рис. 5.13.

Для равновесного состояния (скорость вращения постоянна)  $F_1=F_2$  и, следовательно,  $C_x(V-v)^2 = C'_x(V+v)^2$ . Откуда  $V = v(C'_x{}^{1/2} + C_x{}^{1/2}) / (C_x{}^{1/2} - C'_x{}^{1/2})$ .

Для полый полусферы коэффициент  $C_x=1,42$  и  $C'_x=0,38$ . Тогда  $V=3,1v$ . Этот расчет приблизительный, так как коэффициент  $C_x$  зависит от числа Рейнольдса и угла атаки, а также нужно учитывать влияние следа. При работе в большом диапазоне скоростей сказываются нелинейность характеристики.

*Крыльчатые анемометры.* Ось крыльчатого анемометра располагается вдоль скорости течения. Пренебрегая трением, можно приблизительно оценить скорость по частоте вращения крыльчатки в потоке:  $V=hN$ , где  $V$  – скорость течения,  $N$  – число оборотов в секунду,  $h$  – постоянный коэффициент.

Для практического применения предложены другие формулы, учитывающие трение и порог трогания:  $V=a+bN$ ,  $V=aN+bN^2+c$  (Баумтартон),  $V=a+bN+c/N$  (Пато). Величина констант  $a$ ,  $b$  и  $c$  зависит от характеристик крыльчатки и свойств жидкости.

Характеристики могут меняться со временем (износ подшипников и лопастей), поэтому приходится производить повторные градуировки этих приборов.

*Анемометр Гилла*, применяемый в метеорологии, имеет три взаимно перпендикулярных оси с системами чашек. Он позволяет определить вектор скорости ветра.

Схемы формирования сигнала представляют собой различные схемы определения частоты вращения вертушек (по числу импульсов за единицу времени, тахометры и т. п.)

Рабочие характеристики вертушек зависят от качества изготовления и тщательности градуировки. Точность до 1%. Разрешение по частоте до нескольких Гц. Диапазон скоростей для газов – 0,1 ÷ 30 м/с, для жидкостей – 0,05 ÷ 10 м/с. Нижний предел определяется порогом трогания вертушки (трением оси).

## 5.6. Лазерные и ультразвуковые анемометры

*Лазерный анемометр.* Два луча фокусируются в объеме жидкости  $\sim 0,1 \text{ мм}^3$  и образуют интерференционные полосы (рис. 5.14).

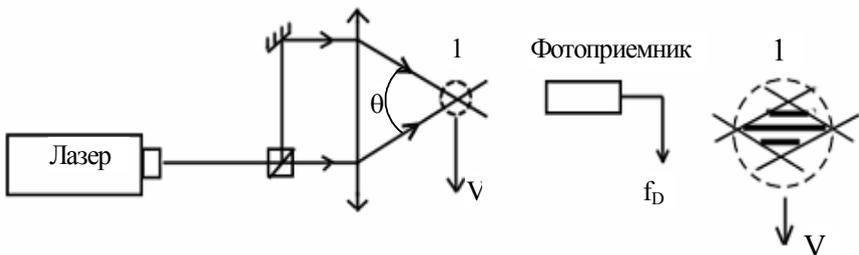


Рис. 5.14.

Ширина полосы  $d = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}$ , где  $\lambda$  – длина световой волны;

$\theta$  – угол между лучами лазера.

Когда частицы, увлекаемые потоком, пересекают зону интерференции, рассеянный ими свет промодулирован частотой  $f_D$  (доплеровская частота), зависящей от скорости частиц и ширины интерференционных полос:  $f_D = \frac{V}{d} = \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$ , где  $V$  – компонента скорости жидкости по нормали к полосам.

Частота  $f_D$  является линейной функцией скорости  $V$ . Таким методом можно измерять скорость  $V$  в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  м/с.

Значение частоты  $f_D$  можно определить различными методами. Очевидно, что для работы метода необходимо присутствие частиц в измеряемом потоке жидкости.

*Ультразвуковой (УЗ) расходомер.* Акустическая волна распространяется в среде со скоростью  $c$ , зависящей от свойств среды и температуры.

Если среда, в которой распространяется волна, движется со скоростью  $V$  относительно наблюдателя, то измеренная им скорость  $c'$  будет равна  $c' = c + V \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между скоростью  $V$  и направлением распространения волны.

Система для измерения скорости  $V$  состоит из излучателя 1 и приемника 2 ультразвуковых колебаний (рис. 5.15).

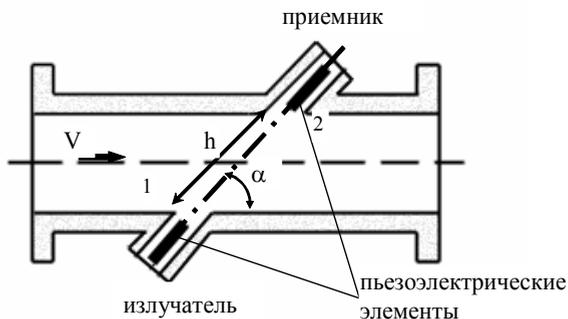


Рис. 5.15.

Время распространения импульса от излучателя до приемника равно  $t_p = \frac{h}{c'} = \frac{h}{c + V \cos \alpha}$ .

Можно получить выражение, не зависящее от  $c$ , измеряя величину  $t_p$  для случая, когда излучатель и приемник меняются

местами. Тогда получим:  $t_{p12} = \frac{h}{c + V\cos\alpha}$ ;  $t_{p21} = \frac{h}{c - V\cos\alpha}$ .

Откуда  $\frac{t_{p12} - t_{p21}}{t_{p12}t_{p21}} = \frac{2V\cos\alpha}{h}$ . В выражении отсутствует скорость  $c$ ,

которая зависит от температуры и рода жидкости.

УЗ расходомеры позволяют измерять расходы от 0,1 до  $10^5$  м<sup>3</sup>/ч в зависимости от диаметра трубопровода, который может составлять от нескольких миллиметров до нескольких метров. Линейность характеристики составляет  $10^{-3}$  от диапазона измерений. Погрешность  $\pm 1\%$ . Время запаздывания до  $10^{-3}$  с.

Достоинствами УЗ расходомера являются: отсутствие подвижных элементов и возмущений течения, независимость от свойств жидкостей.

Недостаток – необходимость градуировки в реальных условиях эксплуатации.

## 5.7. Измерение расхода с помощью радиоактивных добавок

Использование радиоактивных добавок позволяет осуществлять измерения, не зависящие от физических свойств жидкости. Однако эта методика не позволяет определять расход непрерывно, она используется, в частности, для градуировки других расходомеров, установленных на том же трубопроводе.

Метод подмешивания постоянного расхода. Добавка радиоактивного вещества с концентрацией  $C_0$  и постоянным расходом  $q$  вводится в трубопровод, расход  $Q$  в котором неизвестен.

В точке измерения, достаточно далеко вниз по трубе, чтобы добавка полностью смешалась с исследуемой жидкостью, концентрация  $C$  радиоактивного вещества удовлетворяет соотношению  $qC_0 = (Q + q)C$ . Откуда  $Q = q\frac{C_0}{C}$ , пренебрегая  $q \ll Q$ .

Концентрации  $C$  и  $C_0$  определяются образцовыми приборами, определяющими радиоактивность.

*Метод размаха.* В трубопровод кратковременно вводят радиоактивную добавку (рис. 5.16).

После этого определяют моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , когда радиоактивность достигает максимума в точках  $A_1$  и  $A_2$ . Затем определяют скорость  $v$  течения в трубе, полагая ее постоянной по сечению.  $V = L / (t_2 - t_1)$ ;  $Q = Sv$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения трубы.

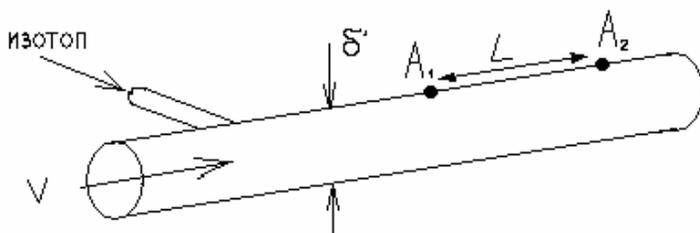


Рис. 5.16.

Радиоактивные добавки: для газов – криптон  $^{85}\text{Kr}$ , излучатель  $\beta$ -частиц, которые детектируются счетчиком Гейгера-Мюллера; для жидкостей – изотоп натрия  $^{24}\text{Na}$ , который испускает  $\gamma$ -излучение, детектируемое, например, сцинтиллятором.

### 5.8. Измеритель массового расхода, использующий силу Кориолиса

Из механики известно, что на массу  $m$ , движущуюся со скоростью  $v$  относительно системы отсчета, находящейся во вращательном движении с угловой скоростью  $\Omega$ , действует сила Кориолиса  $F_K$ , описываемая формулой:  $F_K = 2m [\Omega, v]$ .

На рис. 5.17 показан датчик в виде U-образной трубки, которая

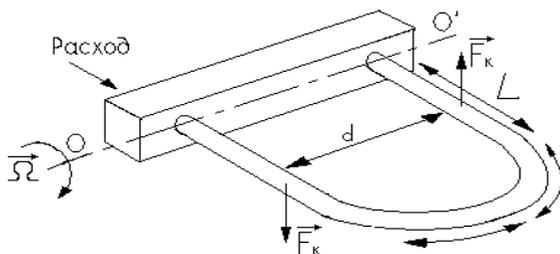


Рис. 5.17.

приводится в колебательное движение вокруг оси  $OO'$  с мгновенной угловой скоростью  $\Omega$ .

Пусть  $\rho$  – плотность жидкости,  $S$  – площадь поперечного сечения трубки,  $L$  – длина одного из рукавов,  $d$  – расстояние между рукавами. В этом случае выражение для массового расхода  $Q = \rho Sv$ ; масса жидкости в одном рукаве –  $m = \rho SL$ ; сила Кориолиса, действующая на один рукав, равна  $F_K = 2\rho SL\Omega v = 2QL\Omega$ ; момент сил Кориолиса, действующих на жидкость в обоих рукавах U-образной трубки, –  $M_K = 2Q\Omega Ld$ .

Под воздействием момента  $M_K$  трубка поворачивается на угол  $\Theta$  и уравнивается моментом сил упругости  $M_y = k\Theta$ . В положении равновесия  $M_K = M_y$ , получаем  $Q = k\Theta/2\Omega Ld$ .

Происходит колебательное движение трубки в направлении сил Кориолиса ( рис. 5.18).

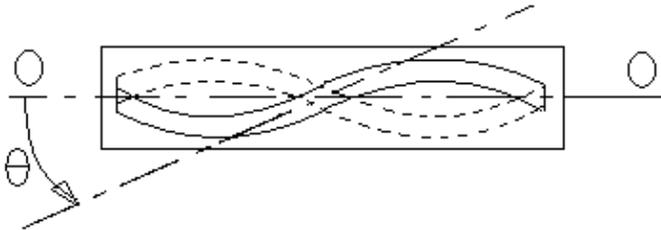


Рис. 5.18.

Угол  $\Theta$  можно измерить датчиками положения и после обработки сигналов получить напряжение, пропорциональное массовому расходу  $Q$ .

Получаемое показание прибора не зависит от свойств жидкости, и для определения  $Q$  не требуется заранее знать ее плотность, вязкость, давление и температуру. Поэтому такой датчик является особенно подходящим для неэлектропроводных, заряженных (смеси жидкости с твердыми частицами), двухфазных (эмульсии), неньютоновских (вязкость зависит от скорости) жидкостей.

Такие датчики позволяют измерять расход от 3 кг/ч до 70 т/ч. Погрешность измерений составляет 0,4 % от полной шкалы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая разница между расходомером и анемометром?
2. На каком принципе действия основана работа расходомеров с сужающими устройствами?
3. Чем различаются расходомеры переменного и постоянного давления?
4. Как работают вихревые расходомеры?
5. Для какой жидкости могут использоваться электромагнитные расходомеры и почему?
6. На каком принципе действия основана работа термоанемометров?
7. Как устроены чашечные и крыльчатые анемометры?
8. Для какой жидкости не подойдет лазерный анемометр?
9. Как работает ультразвуковой расходомер?
10. Назовите два метода определения расхода с помощью радиоактивных добавок.
11. Как устроен расходомер, использующий силу Кориолиса?

## 6. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Давление является важным параметром систем контроля и управления производственными процессами. Давление определяется как сила, действующая на единицу поверхности  $p=dF/dS$ .

Единица давления паскаль (Па) в системе СИ представляет собой давление, действующее равномерно с силой 1 ньютон на площадь  $1\text{ м}^2$ . В технике предпочитают пользоваться кратной величиной баром, равной  $10^5\text{ Па}$  или 750 мм рт.ст. Старая практическая единица  $1\text{ кг/см}^2$  (к использованию не рекомендуется) соответствует 735 мм рт.ст. или 10 м водяного столба.

*Принципы измерения давления.* В неподвижной жидкости измеряется сила  $F$ , действующая на поверхность площадью  $S$  стенки, ограничивающей среду.

Можно рассмотреть 3 случая:

1) измерение с помощью приемника давления на стенке через отверстие, соединенное с прибором;

2) измерение деформации стенки, находящейся под действием давления;

3) измерение посредством датчика давления, преобразующего входной сигнал (давление) в выходной электрический сигнал.

Чувствительным элементом датчика давления в большинстве случаев является динамометрический элемент, какой-либо параметр которого (например геометрический) может изменяться под действием силы  $F=pS$ . На рис. 6.1 показаны различные чувствительные элементы, преобразующие давление в перемещение, деформацию или силу. На рисунке изображены следующие элементы: а) плоская жестко закрепленная мембрана; б) поршень с пружиной (скобой); в) гофрированная мембрана; г) сильфон; д) гофрированный цилиндр; е) трубка Бурдона; ж) 1 – витая трубка, 2 – геликон; з) деформируемый цилиндр; и) биконическая капсула; к) деформируемый поршнем пьезоэлектрик; л) закрытая манометрическая капсула.

В движущейся жидкости различают три вида давления: статическое давление неподвижной жидкости  $p_c$ , динамическое давление  $p_d$ , обусловленное скоростью  $V$  движения жидкости, и полное давление  $p_n = p_c + p_d$ .

Динамическое давление, действующее на поверхность,

нормальную направлению течения, увеличивает статическое давление на величину  $p_o = \rho V^2/2$ , где  $\rho$  – плотность жидкости.

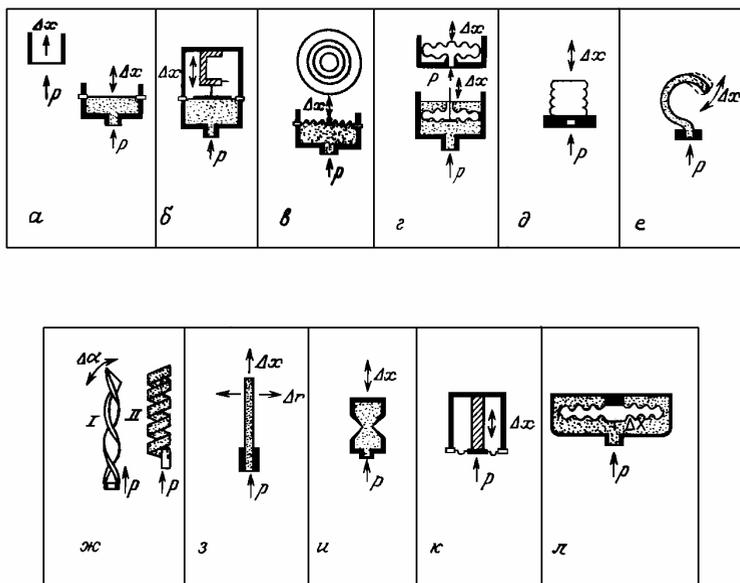


Рис. 6.1.

Измерение этих давлений в движущейся жидкости может быть выполнено с помощью двух отдельных датчиков, соединенных с выходными отверстиями трубки Пито, один из которых Д1 показывает статическое давление, а второй Д2 – полное (рис. 6.2)

Разность показаний этих датчиков даст  $p_o$ . Можно трубки соединить с мембранным датчиком так, чтобы давления  $p_n$ ,  $p_c$  действовали на мембрану с разных сторон, тогда перемещение мембраны будет пропорционально давлению  $p_o = p_n - p_c$ .

Конструкция датчиков делается такой, чтобы оказывать наименьшее влияние на движущуюся жидкость (или газ). Так, для измерения давления на элементах турбомашин разработаны емкостные датчики пленочного типа площадью  $6 \times 4 \text{ мм}^2$  и выступающие над поверхностью не более 80 мкм.



Рис. 6.2.

Конструкция чувствительного элемента определяется диапазоном измеряемых давлений, а также способом преобразования перемещения или деформации чувствительного элемента в электрический сигнал. Основным отличием является точность регистрации давления, которая зависит от принципа преобразования измеряемого давления в электрический сигнал. Такими принципами являются: тензометрический, емкостной, индуктивный, пьезорезистивный, резонансный, ионизационный.

### 6.1. Тензометрический метод

В настоящее время основная масса датчиков давления выпускается на основе чувствительных элементов (рис. 6.3), принцип действия которых основан на измерении деформации тензорезисторов, сформированных в эпитаксиальной пленке кремния на подложке из сапфира (КНС), припаянной твердым припоем к титановой мембране. Иногда вместо кремниевых тензорезисторов используют металлические: медные, никелевые, железные и др.

Принцип действия тензопреобразователей основан на явлении тензоэффекта в материалах. Чувствительным элементом служит мембрана с тензорезисторами, соединенными в мостовую схему. Под действием давления измеряемой среды мембрана прогибается, тензорезисторы меняют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста Уитстона. Разбаланс линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления (рис. 6.3.).

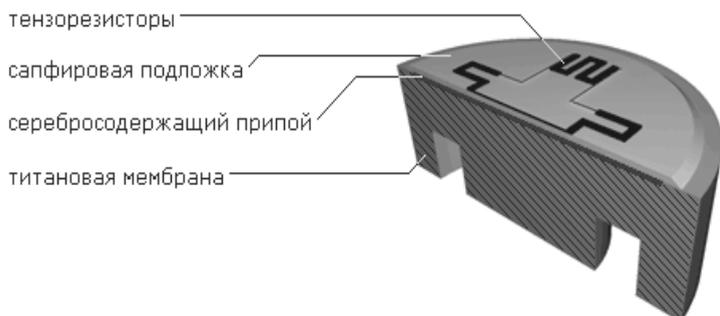


Рис. 6.3.

Следует отметить принципиальное ограничение КНС-преобразователя – неустранимую временную нестабильность градуировочной характеристики и существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры. Это обусловлено неоднородностью конструкции и жесткой связью мембраны с конструктивными элементами датчика. Поэтому, выбирая преобразователь на основе КНС, необходимо обратить внимание на величину основной погрешности с учетом гистерезиса и величину дополнительной погрешности.

К преимуществам можно отнести хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкую стоимость.

## 6.2. Пьезорезистивный метод

Практически все производители датчиков проявляют живой интерес к использованию интегральных чувствительных элементов на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено тем, что кремниевые преобразователи имеют на порядок большую временную и температурную стабильности по сравнению с приборами на основе КНС - структур.

Кремниевый интегральный преобразователь давления (ИПД) представляет собой мембрану из монокристаллического кремния с диффузионными пьезорезисторами, подключенными в мост Уитстона (рис. 6.4). Чувствительным элементом служит кристалл

ИПД, установленный на диэлектрическое основание с использованием легкоплавкого стекла или методом анодного сращивания.

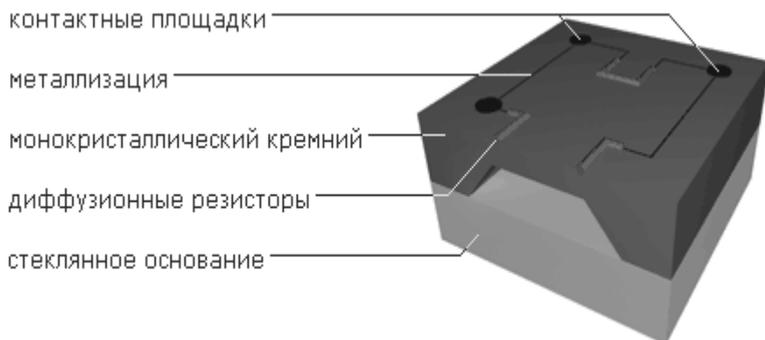


Рис. 6.4.

Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются так называемые дешевые решения, основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с защитой силиконовым гелем (рис. 6.5).

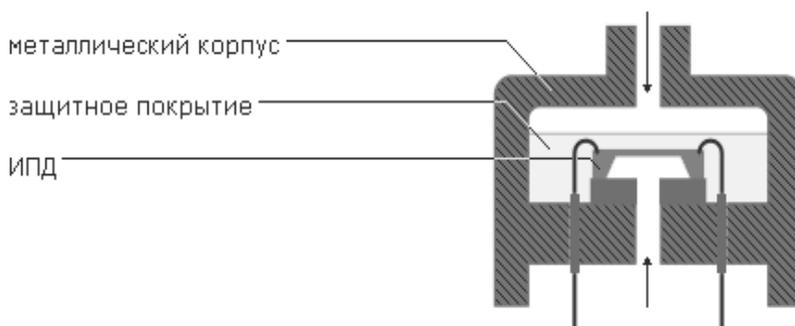


Рис. 6.5.

Для измерения давления агрессивных сред и большинства промышленных применений применяется преобразователь давления в герметичном металлостеклянном корпусе, с

разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды на ИПД посредством кремнийорганической жидкости (рис. 6.6).

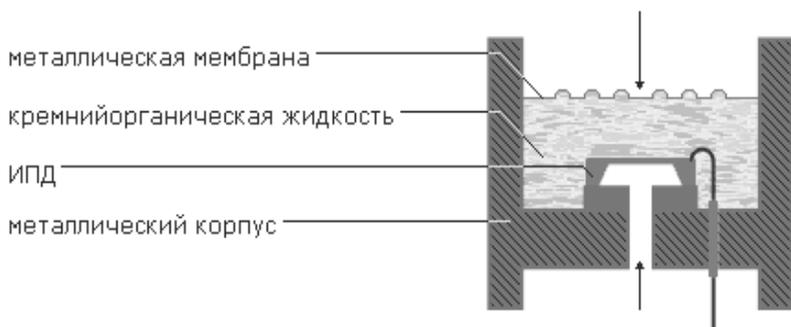


Рис. 6.6.

Основным преимуществом пьезорезистивных датчиков является более высокая стабильность характеристик по сравнению с КНС-преобразователями. ИПД на основе монокристаллического кремния устойчивы к воздействию ударных и знакопеременных нагрузок. Если не происходит механического разрушения чувствительного элемента, то после снятия нагрузки он возвращается к первоначальному состоянию, что объясняется использованием идеально-упругого материала.

### 6.3. Емкостной метод

Емкостные преобразователи используют метод изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые емкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости.

В элементе из керамики или кремния пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью (рис. 6.7).

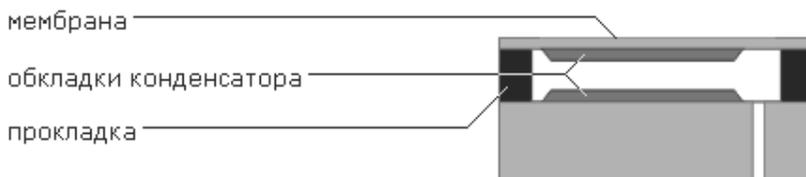


Рис. 6.7.

Достоинством чувствительного емкостного элемента является простота конструкции, высокая точность и временная стабильность, возможность измерять низкие давления и слабый вакуум.

К недостатку можно отнести нелинейную зависимость емкости от приложенного давления.

#### 6.4. Резонансный метод

Резонансный метод используется в датчиках давления на основе вибрирующего цилиндра, струнных датчиках, кварцевых датчиках, резонансных датчиках на кремнии. В основе метода лежат волновые процессы: акустические или электромагнитные. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора.

Частным примером может служить кварцевый резонатор (рис. 6.8). При прогибе мембраны происходит деформация кристалла кварца, подключенного в электрическую схему, и его поляризация. В результате изменения давления частота колебаний кристалла меняется. Подобрать параметры резонансного контура, изменяя емкость конденсатора или индуктивность катушки, можно добиться резонанса.

Преимуществом резонансных датчиков является высокая точность и стабильность характеристик, которая зависит от качества используемого материала.

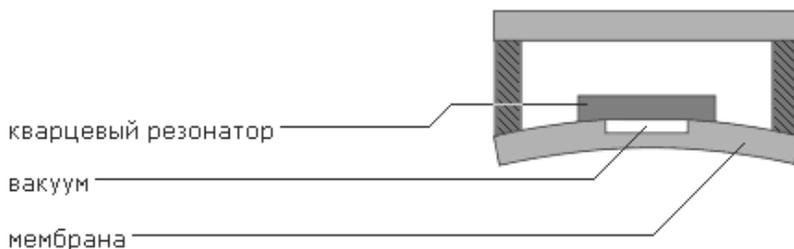


Рис. 6.8.

К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, не возможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

### 6.5. Индуктивный метод

Индуктивный метод основан на изменении индуктивности. Частным примером может служить датчик, чей чувствительный элемент состоит из катушки индуктивности и сердечника из ферромагнитного материала (рис. 6.9).

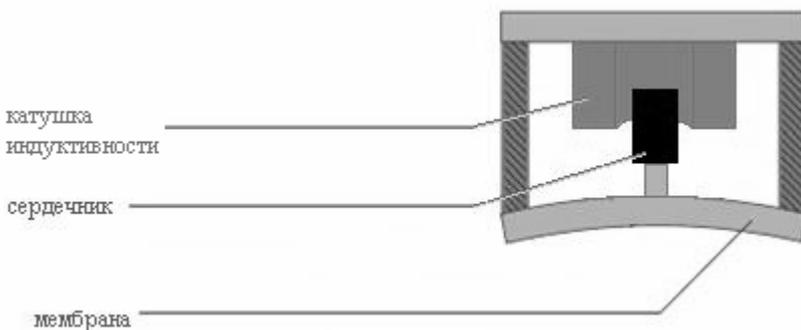


Рис. 6.9.

При прогибе мембраны под действием давления перемещается и сердечник, изменяя тем самым индуктивность катушки.

Преимуществом такой системы является достаточно высокая точность и незначительная температурная зависимость.

Однако датчик чувствителен к магнитным воздействиям.

### 6.6. Ионизационный метод

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются лампы-диоды (рис. 6.10).

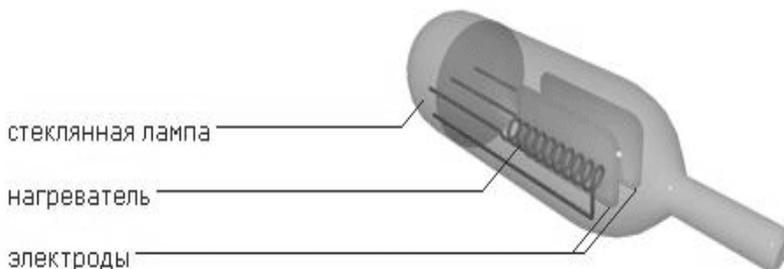


Рис. 6.10.

Лампа оснащена двумя электродами – катодом и анодом, — а также нагревателем. В некоторых лампах последний отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Корпус лампы выполнен из высококачественного стекла.

Преимуществом таких ламп является возможность регистрировать низкое давление – вплоть до глубокого вакуума с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например емкостными. Помимо прочего, ионизационные лампы должны оснащаться дополнительными приборами, поскольку зависимость сигнала от давления является логарифмической.

### 6.7. Заключение

Подводя итог, приведем основные достоинства и недостатки различных методов преобразования давления в электрический сигнал (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Достоинства	Недостатки
<b>Тензометрический (КНС-преобразователи)</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая степень защиты от агрессивной среды</li> <li>2. Высокий предел рабочей температуры</li> <li>3. Налажено серийное производство</li> <li>4. Низкая стоимость</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Неустраняемая нестабильность градуировочной характеристики</li> <li>2. Высокие гистерезисные эффекты от давления и температуры</li> <li>3. Низкая устойчивость при воздействии ударных нагрузок и вибраций</li> </ol>
<b>Пьезорезистивный (на монокристаллическом кремнии)</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая стабильность характеристик</li> <li>2. Устойчивость к ударным нагрузкам и вибрациям</li> <li>3. Низкие (практически отсутствуют) гистерезисные эффекты</li> <li>4. Высокая точность</li> <li>5. Низкая цена</li> <li>6. Возможность измерять давление различных агрессивных сред</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ограничение по температуре (до 150°C)</li> </ol>
<b>Емкостной</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая точность</li> <li>2. Высокая стабильность характеристик</li> <li>3. Возможность измерять низкий вакуум</li> <li>4. Простота конструкции</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зачастую нелинейная зависимость емкости от приложенного давления</li> <li>2. Необходимо дополнительное оборудование или электрическая схема для преобразования емкостной зависимости в один из стандартных выходных сигналов</li> </ol>

Продолжение табл. 6.1

Резонансный	
<p>1. Высокая стабильность характеристик</p> <p>2. Высокая точность измерения давления</p>	<p>1. При измерении давления агрессивных сред необходимо защитить чувствительный элемент, что приводит к потере точности измерения</p> <p>2. Высокая цена</p> <p>3. Длительное время отклика</p> <p>4. Индивидуальная характеристика преобразования давления в электрический сигнал</p>
Индукционный	
<p>1. Высокая точность</p> <p>2. Незначительное влияние температуры на точность измерения</p>	<p>1. Сильное влияние магнитного поля</p> <p>2. Чувствительность к вибрациям и ударам</p> <p>3. Необходимо дополнительное оборудование или электрическая схема для преобразования индуктивной зависимости в один из стандартных выходных сигналов</p>
Ионизационный	
<p>1. Возможность измерения высокого вакуума</p> <p>2. Высокая точность</p> <p>3. Стабильность выходных параметров</p>	<p>1. Нельзя использовать подобные приборы при высоком давлении (низкий вакуум является порогом)</p> <p>2. Нелинейная зависимость выходного сигнала от приложенного давления</p> <p>3. Высокая хрупкость</p> <p>4. Необходимо сочетать с другими датчиками давления</p>

Различные сферы применений определяют свои требования к датчикам: для промышленности – надежность и стабильность характеристик, для лабораторных измерений и расходомерии – точность измерения давления и т. д. Еще одним важным параметром является цена датчиков, которые используют тот или иной принцип преобразования давления. Поэтому при выборе преобразователя необходимо определить наиболее выгодный вариант – соотношение цены и возможностей прибора. Очевидно там, где требуется только какой-либо определенный параметр датчика (например, точность или возможность измерять вакуум), соотношение цены к предъявляемым требованиям высокое. В основном это касается резонансных, индукционных, емкостных и ионизационных датчиков.

В большинстве случаев требуется несколько параметров преобразователей: точность, стабильность выходных характеристик, надежность, долговечность, низкая цена. Таким требованиям, как видно из вышеприведенной таблицы, удовлетворяют пьезорезистивные датчики давления и КНС-преобразователи. Выбрав КНС-преобразователи, вы получите надежные датчики, работающие при высоких температурах (более 150 °С), однако теряете в точности и стабильности выходных характеристик по сравнению с преобразователями на монокристаллическом кремнии. Поскольку в основном требуется высокая стабильность выходных характеристик при невысоких температурах, то интегральные преобразователи давления являются в этом случае оптимальным решением при невысокой цене.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие принципы измерения давления вы знаете?
2. Чем определяется давление движущейся жидкости?
3. В чем заключается тензометрический метод измерения давления?
4. В чем заключается пьезорезистивный метод измерения давления?
5. В чем заключается емкостной метод измерения давления?
6. В чем заключается резонансный метод измерения давления?
7. В чем заключается индуктивный метод измерения давления?

## 7. ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ

Знание влажности воздуха и других газов является существенным для контроля различных технологических процессов. Рассмотрим основные понятия, связанные с влажностью воздуха.

*Массовое отношение влаги*  $g$  – это отношение массы водяного пара  $m_v$  к массе сухого воздуха  $m_a$ :

$$g = m_v / m_a.$$

*Давление насыщенного пара*  $p_s(T)$ , Па – это давление пара, находящегося в равновесии с жидкой водой при температуре  $T$ .

*Относительная влажность*  $V, \%$  – это отношение парциального давления пара  $p_v$  при температуре  $T$  к давлению насыщенного пара:

$$V = p_v / p_s \cdot 100\%.$$

*Температура точки росы*  $T_d, ^\circ\text{C}$  – это температура, до которой нужно охладить влажный воздух, чтобы достичь насыщения. При температуре точки росы:

$$p_v = p_s(T_d).$$

*Температура влажного термометра*  $T_h, ^\circ\text{C}$  – это температура равновесного испарения воды в воздух в случае, когда необходимая для испарения теплота поступает только из воздуха.

*Удельная энтальпия*  $i$ , кДж/кг – это суммарная теплота, содержащаяся в 1 кг влажного воздуха. Принято считать, что нулевая энтальпия соответствует сухому воздуху при  $0^\circ\text{C}$ .

*Гигрометры* можно разделить на две группы:

1) Гигрометры, основанные на физическом законе, позволяющем непосредственно определять влажность.

2) Гигрометры, принцип действия которых основан на измерении свойств тела, связанных с влажностью.

*Конденсационный гигрометр.* Тело, температура которого измеряется, постепенно охлаждается до появления росы или инея на его поверхности. Затем процесс стабилизируют так, чтобы между воздухом и каплями росы поддерживалось равновесное состояние. Измеряемая температура представляет собой точку росы  $T_d$ .

Основными элементами гигрометра являются: зеркало 6 с системой регулирования его температуры 3, нагреватель 4, датчик

температуры зеркала 5, источник светового пучка 1 и оптический детектор 2 (рис. 7.1).

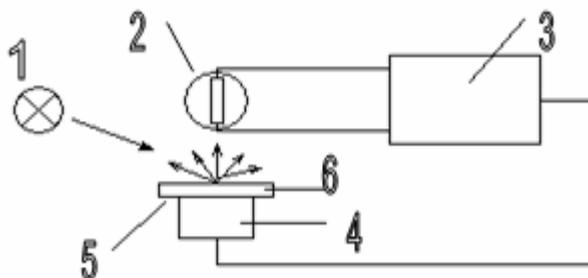


Рис. 7.1.

В отсутствии конденсата свет на детектор не попадает. При охлаждении зеркала появляется конденсат, и рассеянный свет попадает на детектор 2, который через систему 3 дает команду на нагрев зеркала. Роса исчезает, и зеркало снова охлаждается. С помощью настройки можно получить слой конденсата определенной толщины и достичь равновесия между паром и конденсатом. Датчик температуры 5 дает при этом температуру точки росы  $T_d$ .

Характеристики: рабочий диапазон температур от  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; точность до  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время запаздывания от нескольких минут до нескольких часов.

Сложность конструкции, высокая стоимость и необходимость частой регулировки ограничивают область применения лабораторными исследованиями.

*Сорбционный гигрометр* использует следующее явление – давление пара над насыщенным раствором солей ниже давления пара над чистой водой при той же температуре. На практике используется раствор хлорида лития. Датчик состоит из трубки, окруженной тканью, которая пропитана хлоридом лития. На рис. 7.2 схематично показан датчик фирмы Siemens.

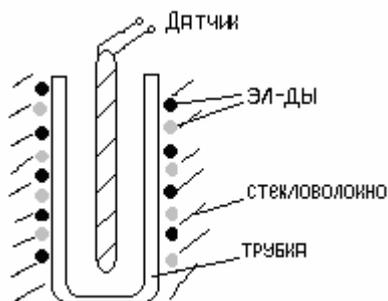


Рис. 7.2.

На трубку намотаны электроды, на которые подается переменное напряжение. В растворе течет ток, который нагревает его и вызывает испарение воды. После испарения воды ток резко уменьшается, что приводит к снижению температуры. Хлорид лития адсорбирует водяной пар, что приводит к увеличению тока и т. д.

Таким образом, осуществляется равновесие между твердым хлоридом лития и его раствором. Это происходит при температуре, соответствующей точке росы. По таблице определяется давление пара  $p_s$  над раствором, которое равно давлению пара  $p_v$  над водой и по которому можно определить относительную влажность  $U = p_v / p_s$ .

Характеристики: погрешность измерений  $\pm 1^\circ\text{C}$  при скоростях воздушного потока  $< 0,5 \text{ м/с}$ ; воспроизводимость датчика  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ; диапазон температур от  $-10$  до  $+60^\circ\text{C}$ .

*Гигрометры на основе изменения импеданса* имеют чувствительный элемент, состоящий из гигроскопического вещества, у которого происходит изменение сопротивления или емкости при изменении окружающей влажности. Такие гигрометры можно разделить на 3 группы: резистивные гигрометры; емкостные гигрометры на основе полимерных диэлектриков; емкостные гигрометры на основе диэлектрического оксида алюминия.

*Гигрометр резистивного типа* состоит из гигроскопического вещества, которое наносится на подложку, и двух электродов из коррозионностойкого металла. Сопротивление между электродами зависит от температуры и содержания воды, которое в свою

очередь зависит от относительной влажности и температуры среды. На рис. 7.3 а представлена типичная зависимость сопротивления от

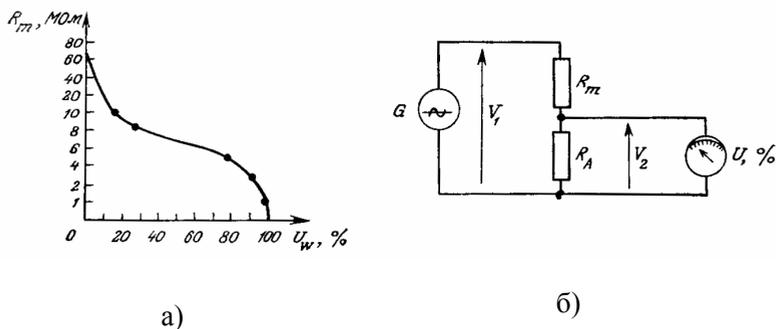


Рис. 7.3.

относительной влажности чувствительного элемента.

Интервал изменения сопротивления от 1 до 80 МОм. Сопротивление  $R_m$  зависит от влажности и от температуры. Влияние последней можно компенсировать с помощью потенциометрической схемы (рис. 7.3 б). Сопротивление  $R_A$  имеет такую же температурную зависимость, как и  $R_m$ .

Характеристики: диапазон измерения от 5 до 95%; температурный диапазон – от  $-10$  до  $+80^\circ\text{C}$ ; постоянная времени – 14 с; погрешность –  $2 \div 5\%$ .

*Емкостной гигрометр на основе полимерного диэлектрика.* Тонкий слой диэлектрика изменяет диэлектрическую проницаемость в зависимости от количества поглощенной из воздуха воды.

Изменение емкости в зависимости от относительной влажности достаточно хорошо описывается линейным законом, а коэффициент пропорциональности слабо зависит от температуры.

Характеристики: диапазон измерений от 0 до 100%; температурный диапазон от  $-40$  до  $+100^\circ\text{C}$ ; точность –  $2 \div 3\%$ ; постоянная времени (до 90% конечной величины) –  $1 \div 2$  с.

*Емкостной гигрометр на основе оксида алюминия.* Диэлектрик (оксид алюминия) наносится на алюминиевую пластинку методом анодного осаждения. Второй электрод наносится на диэлектрик.

При толщине оксидного покрытия менее 0,3 мкм изменение емкости зависит только от парциального давления водяного пара и не зависит от температуры.

Гигрометры такого типа наиболее удобны для измерения низких значений влажности.

Характеристики: диапазон температур от  $-80$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ; быстродействие – несколько секунд; диапазон давлений – от вакуума до нескольких сотен атмосфер.

Не рекомендуется использовать датчик в активных средах, таких, как хлорид натрия, сера, которые взаимодействуют с алюминием.

*Психометр.* Этот гигрометр состоит из двух термометров, обдуваемых воздухом. Чувствительный элемент одного термометра обернут марлей, увлажняемой дистиллированной водой. Он дает температуру «влажного термометра». Другой – температуру «сухого термометра».

Относительная влажность воздуха определяется по этим температурам с помощью специальной таблицы.

Достоинством психометра является простота и высокая воспроизводимость.

Чувствительность психометра зависит только от чувствительности датчиков температуры.

Психометры, не рассчитанные на непрерывную подачу воды от фитиля, имеют предел измерения до  $40^{\circ}\text{C}$ , а при непрерывной подаче воды – до  $90 \div 100^{\circ}\text{C}$ .

Разработан психометр для использования в сушильнях, который может работать до температур сухого термометра  $200 \div 250^{\circ}\text{C}$  при температуре влажного термометра  $20 \div 75^{\circ}\text{C}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое относительная влажность воздуха и в каких единицах она выражается?
2. На каком принципе действия работает конденсационный гигрометр?
3. На каком принципе действия работает сорбционный гигрометр?
4. Как работают резистивные и емкостные гигрометры?
5. Что такое психометр?

## 8. ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 8.1. Виды ядерного излучения

*Альфа-частицы* – это ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ , образованного двумя протонами и двумя нейтронами, имеет положительный заряд  $2q_e$  ( $q_e$  – заряд электрона) и массу в 7000 раз больше массы электрона.

Энергия  $\alpha$ -частиц лежит в диапазоне  $3 \div 10$  МэВ. Это энергия кинетическая и соответствующие ей скорости равны от 12100 км/с (3 МэВ) до 21900 км/с (10 МэВ).

Длина пробега  $\alpha$ -частицы  $L$  представляет собой расстояние, которое она преодолевает, передав всю энергию окружающей среде.  $L$  зависит от энергии  $\alpha$ -частицы и плотности среды. Для воздуха  $L(\text{см}) = 0,32W^{1,5}$ , где  $W$  – энергия в МэВ.

Примерные величины пробега  $\alpha$ -частиц при  $W = 3$  МэВ: в воздухе – 25 мм; в бумаге и пластмассе – 20 мкм; в железе – 6 мкм.

В промышленности  $\alpha$ -излучение используют для определения толщины тонких слоев материалов.

*Бета-частицы*. Различают  $\beta^-$ -частицы двух видов:  $\beta^-$  – электрон с зарядом  $-q_e$  и массой  $m_e$  и  $\beta^+$  – позитрон с зарядом  $+q_e$  и массой  $m_e$ .

В промышленных датчиках находит применение только  $\beta^-$ -излучение. Энергетический спектр  $\beta^-$ -излучения лежит в широком диапазоне, достигает максимальных энергий 13 МэВ. При энергии 0,7 МэВ скорость  $\beta^-$ -частицы равна 270000 км/с, т. е. 0,9  $c$ , где  $c$  – скорость света.

Пробег  $\beta^-$ -частицы в веществе значительно больше, чем у  $\alpha$ -частицы. Так, в алюминии при  $W = 1$  МэВ пробег  $\alpha$ -частицы равен 4 мкм, а  $\beta^-$ -частицы – 1,5 мм.

$\beta^-$ -излучение также используется в промышленности для измерения толщины материалов с малой поверхностной плотностью ( $\sim 10^{-3}$  г/см<sup>2</sup>) – бумаги, картона, пластмасс.

*Гамма-излучение* имеет ту же физическую природу, что и свет, но энергия одного  $\gamma$ -кванта  $W = h\nu$  превышает энергию кванта света в  $10^4 \div 10^6$  раз. Спектр  $\gamma$ -излучения, испускаемого одним источником, состоит из нескольких видов излучения с энергиями,

характерными для этого источника, в интервале от нескольких десятков КэВ до нескольких МэВ.

При взаимодействии  $\gamma$ -кванта с веществом может произойти один из эффектов.

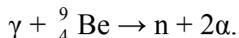
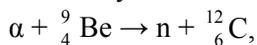
Фотоэлектрический эффект – выбивание электрона с полной передачей энергии.

Эффект Комптона – упругое соударение с электроном с частичной передачей энергии электрону.

Материализация – превращение в пару электрон-позитрон, при условии, что энергия  $\gamma$ -кванта больше энергии покоя этих двух частиц.

Гамма-излучение достаточно глубоко проникает в плотные материалы (например сталь) и используется для измерения толщины металлических листов или плотности и уровня веществ, циркулирующих в трубопроводах или резервуарах.

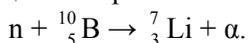
*Нейтроны* – это частицы с нулевым электрическим зарядом и массой, близкой к массе протона. Лишь немногие радиоизотопы являются источниками нейтронов. Обычно в источниках используется ядерная реакция с легкими элементами (литий, бор, бериллий), подвергнутыми облучению  $\alpha$ - или  $\gamma$ -излучением:



Нейтроны, используемые в этих реакциях, называются быстрыми, т.к. их энергия велика ( $\sim 10$  и  $\sim 0,2$  МэВ соответственно). Источники быстрых нейтронов изготавливают, смешивая порошок бериллия с элементом, испускающим  $\alpha$ - или  $\gamma$ -излучение.

Проходя через вещество, нейтрон испытывает только упругие соударения с ядрами. Вероятность этого процесса мала, поэтому глубина проникновения в вещество велика. Так, для  $W = 10$  МэВ глубина проникновения в бетон составляет десятки сантиметров.

Легкие элементы эффективнее замедляют нейтроны и понижают их энергию до тепловой ( $W \approx 0,025$  эВ). Такие нейтроны называются тепловыми. Только тепловые нейтроны способны вызвать ядерную реакцию с бором:



Эта реакция позволяет косвенным образом детектировать тепловые нейтроны по испущенным  $\alpha$ -частицам. Таким образом, обычный детектор медленных нейтронов представляет собой детектор  $\alpha$ -частиц, содержащий соединение бора.

Нейтронное излучение используется в промышленности для измерения концентрации водородосодержащих соединений, например воды, в материалах: руде, угле, песке и т. п.

Рассмотрим единицы дозиметрии излучения.

*Экспозиционная доза.* Эта величина характеризует рентгеновское и  $\gamma$ -излучение и ее единицей является рентген (Р).

1 рентген соответствует дозе облучения, которая приводит к образованию в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при нормальных условиях 1,293 мг количества ионов с полным зарядом (обоих знаков), равным одной электростатической единице заряда в системе СГС, что соответствует  $2,1 \cdot 10^9$  пар ионов ( $1 \text{ кулон} \approx 3 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}$ ).

*Мощность дозы* характеризует эффект, производимый в единицу времени (с, мин, час), и выражается в Р/с, Р/мин, Р/час. Для других видов излучения используется единица ФЭР (физический эквивалент рентгена) – это доза, создающая в воздухе такое же число пар ионов, что и облучение рентгеновским излучением дозой в 1 рентген.

*Поглощенная доза* зависит от вида облучения и вещества. Единицей является грей (Гр), который соответствует поглощению одного джоуля энергии одним килограммом вещества.

## 8.2. Детекторы на основе ионизации газов

Полезный объем газа находится между двумя электродами, к которым приложена постоянная разность потенциалов. Падающее излучение ионизирует газ, высвобождая электрические заряды, собираемые на электродах.

Если поле между электродами велико, то электроны получают достаточно энергии для образования новых пар ионов в результате столкновения с молекулами газа. В зависимости от приложенной разности потенциалов  $V$  различают разные режимы функционирования детектора (рис. 8.1).

Зона 1: поле слабое; рекомбинации электрон – положительный ион происходят раньше, чем носители достигнут электродов: число

ионов  $N$ , достигших электродов, меньше числа ионов  $N_0$ , образуемых падающей частицей ( $N < N_0$ ).

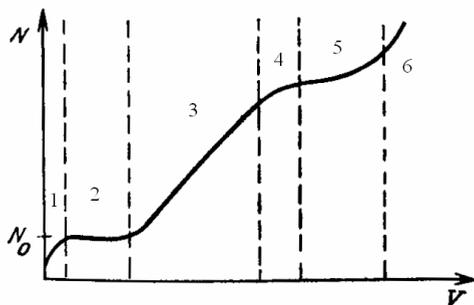


Рис. 8.1.

Зона 2: все высвободившиеся заряды достигают электродов независимо от величины  $V$ ,  $N = N_0$ .

Зона 3: в результате соударений носителей происходит умножение  $N = MN_0$ , где коэффициент умножения  $M$  может достигать  $10^3$  и не зависит от  $N_0$  (режим пропорционального счетчика).

Зона 4: множитель  $M$  зависит от  $N_0$  (полупропорциональный режим).

Зона 5: выходной сигнал детектора не зависит от  $N_0$ . Так функционирует счетчик Гейгера – Мюллера.

Зона 6: функционирование неустойчиво, разряды происходят, когда напряжение достигает величины напряжения пробоя  $V_H$ .

*Ионизационная камера.* Газ в детекторе испытывает воздействие частиц  $n$  в сек. На аноде возникает ток  $I = q_e n N_0$ , где  $q_e$  – заряд электрона. Этот ток составляет  $10^{-15} \div 10^{-14}$  А и не зависит от приложенного напряжения  $V$  (режим 2) в диапазоне нескольких сотен вольт. Измеряемый сигнал представляет собой падение напряжения на большом сопротивлении  $R_H > 10^{10}$  Ом.

Газ, давление и тип окна подбираются в зависимости от природы исследуемого излучения.

При регистрации  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения заполняющим газом является воздух при давлении  $p$  ниже атмосферного  $p_{\text{атм}}$ ; окно тонкое из алюминия или бериллия.

При регистрации рентгеновского излучения используются тяжелые газы (Ar, Xe) при  $p \leq p_{\text{атм}}$  и тонкое окно из бериллия.

При регистрации  $\gamma$ -излучения также используются тяжелые газы (Ar, Xe) при  $p \leq p_{\text{атм}}$ . Толщина стенок порядка средней длины пробега выбиваемых из них электронов, которые попадают в полезный объем, внося свой вклад в ионизацию газа.

*Пропорциональный счетчик.* Сигнал на выходе пропорционален числу соударений исходного количества ионов  $N_0$ . Коэффициент  $M=10^2 \div 10^3$  и зависит от природы газа и возрастает от его давления и напряжения  $V$  на электродах. Такое усиление оказывается достаточным для детектирования отдельной частицы. Например: при  $M=500$ ,  $N_0=200$ ,  $C=10$  пФ,  $V_{\text{вых}}=1,6$  мВ. Амплитуда выходного импульса пропорциональна энергии, которую теряет частица, проходя через полезный объем. Сравнение амплитуд выходных импульсов позволяет разделить сигналы различных видов излучения. Можно детектировать  $\alpha$ -частицы (большой  $N_0$ ) в присутствии  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений (малое  $N_0$ ).

*Счетчик Гейгера-Мюллера.* Если электрическое поле достаточно велико, то первичные ионы, образуемые падающим излучением, приобретают энергию, достаточную для того, чтобы вторичные ионы, возникающие в результате соударений, перевести в возбужденное состояние. Эти ионы испускают фотоны в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, в свою очередь, в результате фотоэлектрического эффекта вызывают ионизацию газа и испускание электронов металлическим катодом. Такой лавинообразный процесс приводит к образованию выходного сигнала, амплитуда которого ( $1 \div 10$  В) не зависит от числа первичных ионов, образованных активной частицей. Поэтому счетчик Гейгера – Мюллера используется только для детектирования частиц, а не для измерения их энергии.

Чтобы остановить лавинный процесс, инертный газ счетчика смешивают с газом-галогеном, который поглощает ультрафиолетовое излучение, и в анодную цепь включают

сопротивление  $R_1 = (2 \div 10)$  МОм, так что при зарождении лавины напряжение анод-катод резко уменьшается и лавинный процесс прерывается.

Конструкция трубки Гейгера – Мюллера и ее электрическая схема представлены на рис. 8.2 а, где 1 – входное окно, 2 – корпус, 3 – анод.

Сопротивление  $R_2 = (0,1 \div 1)$  МОм. Амплитуда импульса на выходе определяется выражением:  $U_{\text{ВЫХ}} = [R_2(E - U_{\text{ПОР}})] / (R_1 + R_2)$ , где  $U_{\text{ПОР}}$  – пороговое напряжение, при котором прекращается лавинный процесс,  $E$  – напряжение питания.

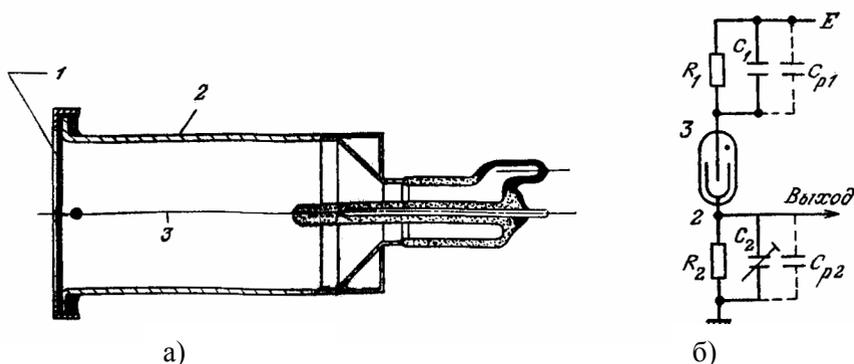


Рис. 8.2.

На рис. 8.2 б емкости  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – паразитные. Чтобы избежать искажения импульсов, параллельно им подключаются  $C_1$  и  $C_2$ , так чтобы  $(C_{p1} + C_1)R_1 = (C_{p2} + C_2)R_2$ . Выходные импульсы имеют малое время нарастания (мкс) и медленный спад (50÷150 мкс).

Время разрешения – интервал между двумя импульсами, которые могут быть зарегистрированы, составляет для различных трубок от десятков до сотен мкс.

Эффективность детектирования  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц ограничивается прозрачностью входного окна, и для частиц, попавших в рабочий объем, достигает 100%.

Эффективность детектирования  $\gamma$ -квантов составляет менее 1%. Тепловые нейтроны могут быть обнаружены при использовании трубки, заполненной  $^{10}\text{BF}_3$ , в которой на один из электродов нанесен тонкий слой бора.

### 8.3. Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный детектор представляет собой комбинацию сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Активная частица передает энергию атомам или молекулам сцинтиллятора, приводя их в возбужденное состояние. Их возвращение в основное состояние сопровождается испусканием фотонов (явление флюоресценции), длина волны которых обычно соответствует области между голубым цветом и ближним УФ. Эти кванты улавливаются ФЭУ, на выходе которого появляется импульс.

Для детектирования заряженных частиц применяют сульфид цинка и легкие органические вещества, например антрацен.

$\gamma$ -кванты детектируются косвенным образом по сцинтилляции, которую вызывают электроны, высвобождаемые в результате фотоэлектрического эффекта и эффекта Комптона веществом сцинтиллятора (NaI, CsI).

Детектирование нейтронов производится с использованием смеси бора  $^{10}\text{B}$  и сульфида цинка, при этом сцинтилляция вызывается испущенными  $\alpha$ -частицами.

Амплитуда выходного сигнала для данной частицы пропорциональна теряемой ею энергии и зависит от природы частицы.

Длительность сигнала связана с временем жизни возбужденных состояний атомов сцинтиллятора и составляет от нескольких микросекунд (ZnS) до нескольких наносекунд (органические вещества). Она значительно ниже соответствующих характеристик пропорционального счетчика.

Достоинством сцинтилляционных детекторов является высокая доля регистрируемых частиц и высокая эффективность детектирования  $\gamma$ -излучения. Недостатки связаны с использованием ФЭУ.

## 8.4. Полупроводниковые детекторы

Частица, попавшая в детектор, вызывает в нем ионизацию атомов полупроводникового материала, т. е. образование пар электрон-дырка. Для образования одной пары необходимы энергетические затраты порядка нескольких эВ. Они примерно в 10 раз меньше, чем для ионизации газа, соответственно возрастает выходной сигнал.

Чтобы избежать рекомбинации пары, эти заряды должны высвобождаться в зоне с сильным электрическим полем, которое обеспечит быстрое разделение и сбор носителей, например в зоне р-n - перехода (диода) с обратной поляризацией. Ширина этой зоны  $l_d$  определяется выражением  $l_d \approx \sqrt{\rho V}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $V$  – приложенное обратное напряжение.

Увеличение полезного объема детектора обеспечивается путем расширения обедненной зоны, что приводит к увеличению удельного сопротивления  $\rho$  вещества вблизи перехода и к поляризации перехода при действии значительного напряжения обратного знака, хотя и недостаточного для его пробоя.

Кроме того, чтобы уменьшить потери энергии частицы в зоне вне р-n - перехода, нужно сделать эту зону очень узкой.

*Диод с поверхностным барьером.* Переход образуется в результате поверхностного окисления кремния n-типа, причем оксидный слой относится к р-типу. Затем наносится тонкий золотой электрод ( $\cong 200\text{\AA}$ ) (рис.8.3, а, б). При этом обедненная зона может простирается на всю глубину слоя кремния ( $\cong 1$  мм) без какой-либо мертвой зоны как перед ней, так и после нее.

Такой диод используется для детектирования  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц.

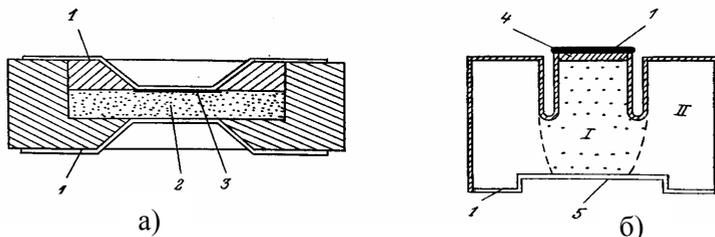


Рис. 8.3.

*Диод из кремния или германия, легированного литием.* Детектор этого типа изготавливают путем термодиффузии и миграции донорных атомов лития в электрическом поле в кремнии или германии р-типа при одновременной нейтрализации акцепторных примесей. Строгий контроль за процессом позволяет получить диод, содержащий три области:

- область р-типа, в которой литий (n) с избытком компенсирует р-тип исходного полупроводника;

- область i-типа собственной проводимости с высоким удельным сопротивлением, в которой литий в точности компенсирует исходный р-тип;

- область р-типа, не модифицированную литием.

Такой диод, содержащий три указанные области, называется диодом с pin-структурой. Германиевый диод следует использовать исключительно при низкой температуре (77К), чтобы избежать осаждения лития. Кремниевый диод можно использовать вплоть до 300К. Описанные диоды находят следующее применение: Si(Li) до 300К –  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы; Si(Li) и Ge(Li) при 77К – рентгеновское и  $\gamma$ -излучение.

*Диод на основе германия высокой чистоты.* Можно получить германий с очень низкой концентрацией примесей и, следовательно, с высоким удельным сопротивлением. Очень узкая (0,4 мкм) область n-типа образуется имплантацией донорных ионов. обедненная зона может занимать весь объем германия р-типа и простирается на глубину до нескольких сантиметров. Такой датчик пригоден для использования при комнатной температуре для детектирования рентгеновского и  $\gamma$ -излучения. Схема включения датчика показана на рис. 8.4.

К достоинствам полупроводниковых детекторов относятся малые размеры, прочность, линейность характеристики, высокое быстродействие (до  $10^{-9}$  с).

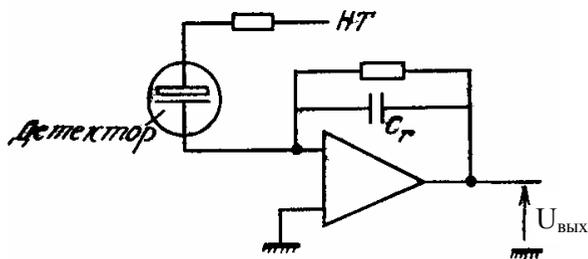


Рис. 8.4.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды радиоактивного излучения вы знаете?
2. Какие единицы используются в дозиметрии? Дайте их определение.
3. Какие режимы работы различают в детекторах на основе ионизации газа? От чего зависят эти режимы?
4. Что такое ионизационная камера?
5. Что такое пропорциональный счетчик?
6. В каком режиме работает счетчик Гейгера-Мюллера?
7. Какие трудности возникают при регистрации альфа-частиц?
8. Какие трудности возникают при регистрации нейтронов?
9. На каком принципе работает сцинтилляционный детектор?
10. Как работает полупроводниковый детектор?
11. Какие преимущества имеют полупроводниковые детекторы перед газовыми детекторами?

## 9. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

### 9.1. Фотометрия

Величины, относящиеся к световому измерению, могут оцениваться двояко: по количеству энергии (энергетическая фотометрия); с учетом производимого зрительного впечатления (визуальная фотометрия).

*В энергетической фотометрии* используются следующие величины:

*Энергия излучения  $Q$*  – испускаемая или принимаемая энергия, измеряется в джоулях.

*Поток излучения  $\Phi$*  – мощность излучения  $dQ/dt$ , измеряется в ваттах.

*Сила излучения  $I$*  – поток излучения в единичном телесном угле, измеряется в Вт/ср.

*Энергетическая яркость  $L$*  – сила излучения с элемента поверхности  $dA$  в заданном направлении, отнесенная к площади ортогональной проекции  $dA_n$  этого элемента на плоскость, перпендикулярную указанному направлению, выражается в Вт/(ср м<sup>2</sup>).

*Энергетическая облученность  $E$*  – поток излучения, падающий на элемент поверхности, отнесенный к площади этого элемента ( $E=d\Phi/dA$ ), измеряется в Вт/м<sup>2</sup>.

*В визуальной фотометрии* речь идет о количественном выражении световых величин с учетом зрительного впечатления. Относительная чувствительность глаза  $V(\lambda)$  к различным монохроматическим излучениям представлена кривой на рис. 9.1.

Различные величины в визуальной фотометрии при монохроматическом излучении оцениваются умножением соответствующей энергетической величины на коэффициент  $683V(\lambda)$ . Так, поток излучения в визуальной фотометрии  $\Phi_v(\lambda)$  будет равен  $\Phi_v(\lambda) = 683\Phi(\lambda)$  лм, где  $\Phi(\lambda)$  – поток излучения на длине волны  $\lambda$ , Вт.

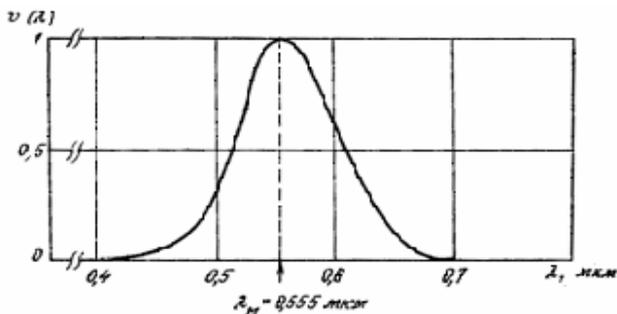


Рис. 9.1.

Для непрерывного по спектру излучения полный поток

$$\Phi_B = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} V(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda.$$

Аналогично получаются другие величины. В табл. 9.1 перечислены все основные фотометрические единицы.

Таблица 9.1

Параметр	Световые единицы	Энергетические единицы
Поток	люмен (лм)	ватт (Вт)
Сила света и сила излучения	кандела (кд)	ватт/стерадиан (Вт/ср)
Яркость	кандела/м <sup>2</sup> (кд/м <sup>2</sup> )	ватт/ср·м <sup>2</sup> (Вт/ср·м <sup>2</sup> )
Освещенность и облученность	люмен/м <sup>2</sup> или Люкс	ватт/м <sup>2</sup> (Вт/м <sup>2</sup> )
Энергия	люмен·с (лм·с)	джоуль

*Характеристики оптических датчиков.* Выходной величиной оптического датчика обычно является электрический ток.

*Темновой ток* – это ток на выходе датчика, помещенного в темноту и находящегося при определенных условиях питания. Он зависит от температуры и подвержен флуктуациям, связанным с собственными параметрами. Он определяет нижний предел регистрации сигнала.

*Чувствительность*  $S$  – это отношение изменения выходной величины  $\Delta I$  к изменению измеряемой величины  $\Delta \Phi$ :  $S = \Delta I / \Delta \Phi$ . Чувствительность выражается в А/Вт, А/лм или А/лк.

*Спектральная чувствительность*  $S(\lambda)$  – это чувствительность датчика на длине волны  $\lambda$ . Кривая спектральной чувствительности показывает изменение относительной чувствительности в функции длины волны:  $S(\lambda)/S(\lambda_p)$ , где  $\lambda_p$  – длина волны, соответствующая максимуму чувствительности.

*Интегральная чувствительность*  $S_i$  – это чувствительность датчика, принимающего монохроматический сигнал. Она зависит от спектральной чувствительности датчика, с одной стороны, и от спектрального распределения самого излучения, с другой. Она всегда меньше, чем максимальная спектральная чувствительность  $S(\lambda_p)$ .

*Обнаружительная способность*  $D$  характеризует способность датчика обнаружить слабые сигналы, определяется собственными шумами датчика и, естественно, тем выше, чем меньше шумы. Выражается в единицах  $[\text{Вт}^{-1} \text{Гц}^{1/2}]$ .

## 9.2. Фоторезисторы

Принцип действия датчика основан на физическом явлении внутреннего фотоэффекта, т. е. возбуждении в материале датчика электрических зарядов под действием света и обусловленном этим увеличением проводимости.

Фоточувствительные элементы фоторезисторов выполняются из полупроводниковых поликристаллических материалов или монокристаллических материалов с собственной проводимостью (чистых) или с примесной проводимостью (легированных).

Величина темнового сопротивления  $R_{co}$  зависит от формы, размеров, температуры и материала фоточувствительного слоя.

Очень высоким темновым сопротивлением обладают: PbS, CdS, CdSe (от  $10^4$  до  $10^9$  Ом при  $25^\circ\text{C}$ ). Малое темновое сопротивление

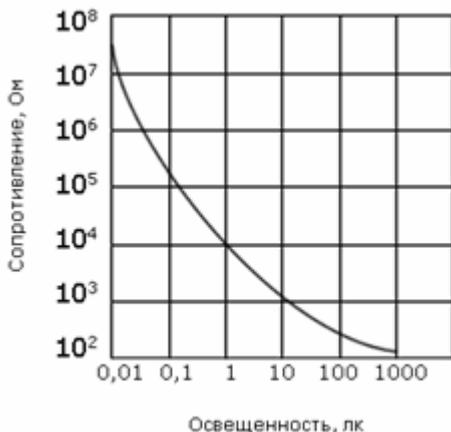


Рис. 9.2.

(от  $10$  до  $10^3$  Ом при  $25^\circ\text{C}$ ) у InSb, InAs, CdHgTe. Сопротивление фоторезистора быстро падает с увеличением облученности (рис. 9.2).

Сопротивление нелинейно зависит от падающего потока и зависит от температуры, однако с ростом освещенности чувствительность к температуре ослабевает. Максимальная рассеиваемая мощность составляет около милливатта на  $1\text{ мм}^2$  чувствительной поверхности.

Область спектральной чувствительности зависит от материала фотосопротивления. Для CdS, CdSe, PbS, SbIn спектральная область лежит в диапазоне  $\lambda$  от  $0,3$  до нескольких мкм, а для GeSi от  $2$  до  $30$  мкм. Спектральная чувствительность  $S(\lambda)=\Delta I/\Delta\varphi(\lambda)$  обычно выражается в относительных единицах. Чувствительность  $S(\lambda)$  зависит от температуры; при снижении температуры, как правило, наблюдается рост величины  $S(\lambda)$  и сдвиг пороговой длины волны в направлении, которое зависит от материала – в сторону более длинных волн для соединений свинца и в сторону более коротких волн для соединений индия.

Быстродействие фоторезистора характеризуют постоянной времени (хотя изменение сопротивления происходит не по экспоненте). Постоянная времени зависит от материала фоторезистора и лежит в диапазоне от 0,1 мкс для InAs, CdHgTe и от 0,1 до 100 мс для PbS, PbSe, CdSe. Постоянная времени зависит также от перепада потока  $\Delta\Phi$  и уменьшается с ростом перепада освещенности. Достоинства фоторезисторов заключаются прежде всего в высоких значениях статического коэффициента преобразования ( $I/\Phi$ ) и чувствительности ( $\Delta I/\Delta\Phi$ ), что позволяет использовать простые схемы измерения (например реле).

Недостатки следующие: нелинейность характеристики  $I=f(\Phi)$ ; недостаточное быстродействие; нестабильность характеристик (старение); зависимость характеристик от температуры; необходимость охлаждения для некоторых типов фоторезисторов.

Фоторезисторы находят применение в таких исследованиях, когда не требуется прецизионных измерений. В фотометрии применение возможно, если характеристики фоторезисторов стабилизированы и определены с высокой точностью.

### 9.3. Фотодиоды

Если к р-n-переходу приложить обратное напряжение, то обратный ток диода будет определяться током неосновных носителей. Под воздействием излучения образуются пары электрон-дырка. Чтобы эти носители могли внести заметный вклад в протекающий ток, нужно, чтобы они не рекомбинировали; для этого они должны быть быстро разделены под воздействием поля. Это возможно только в обедненном слое (рис. 9.3).

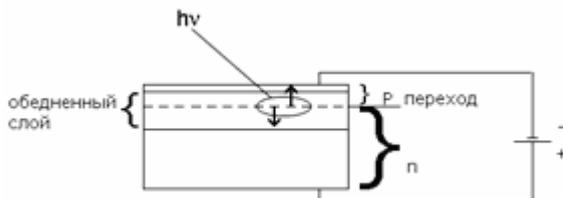


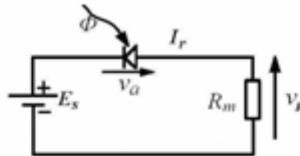
Рис. 9.3.

Падающее излучение должно достигать обедненного слоя, проходя через освещенный полупроводниковый слой без заметного ослабления. Таким образом, необходимо, чтобы пластина освещаемого полупроводника была очень тонкой и чтобы через нее проходила большая часть падающей энергии, а обедненный слой был толстым для максимального поглощения излучения.

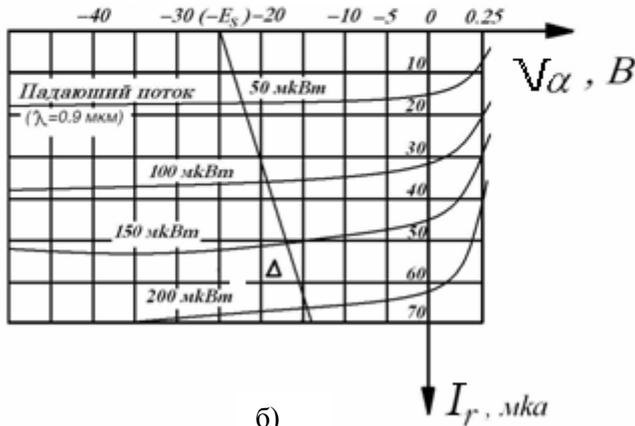
В качестве материалов фотодиодов используются:

а) кремний и германий – для применения в видимой и ближней инфракрасной областях;

б) GaAs, InAs, InSb, HgCdTe – для применения в инфракрасной области. Схема включения фотодиода представлена на рис. 9.4, а. На рис. 9.4, б показаны вольт-амперные характеристики и проведена линия, соответствующая  $R_{\text{н}}$ .



а)



б)

Рис. 9.4.

Рабочая точка определяется пересечением линии нагрузки и соответствующей характеристики фотодиода. Режим работы линейный, т. к. величина  $U_{\text{вых}}$ , как и ток  $I_r$ , пропорциональна потоку. Этот режим называется *фотодиодным*.

*Фотогальванический режим.* При этом режиме на фотодиод не подается напряжения, он работает как преобразователь энергии. Увеличение тока неосновных носителей под действием падающего потока вызывает перенос заряда, что понижает потенциальный барьер на  $\Delta v_b$ . Это приводит к росту тока основных носителей, так что поддерживается суммарный ток  $I_r$ . Понижение потенциального барьера на  $\Delta v_b$  можно измерить на выводах фотодиода в разомкнутой цепи (на холостом ходу).

Если к выводам фотодиода подсоединить нагрузку  $R_n \ll r_d$ , где  $r_d$  – сопротивление фотодиода, то протекающий ток будет пропорционален падающему потоку. Важной особенностью этого режима работы является отсутствие темнового тока. Темновой ток в фотодиодном режиме при комнатной температуре имеет порядок наноампер. Однако он быстро возрастает при росте температуры.

В фотогальваническом режиме напряжение на переходе также очень чувствительно к температуре.

Спектральная чувствительность в двух режимах одинакова. С ростом температуры максимум чувствительности сдвигается в сторону более длинных волн.

Временные характеристики обычно определяются сопротивлением нагрузки и паразитными емкостями. В фотодиодном режиме быстродействие имеет порядок наносекунд, в фотогальваническом – сотен наносекунд.

На рисунке приведены схемы включения фотодиода в фотодиодном (рис. 9.5 а) и в фотогальваническом режиме (рис. 9.5, б).

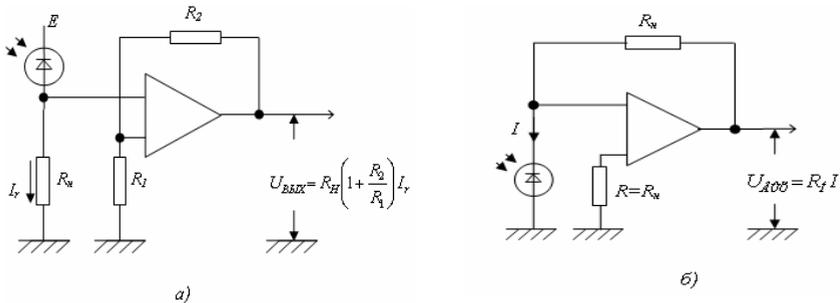


Рис. 9.5.

### 9.4. Лавинные фотодиоды

При приложении к фотодиоду обратного напряжения  $V_r$  на несколько десятых вольта меньше напряжения пробоя  $V_{пр}$  возникшим за счет фотоэлектрического эффекта носителям сообщается энергия, достаточная для ударной ионизации атомов в зоне перехода и создания новых электронно-дырочных пар. При этом происходит умножение носителей, и в фотодиоде будет наблюдаться лавинный процесс. Коэффициент умножения  $M$  зависит от величины обратного напряжения:  $M = k(I - V/V_{пр})^{-1}$ , где  $k$  – константа, зависящая от конструкции фотодиода. Напряжение пробоя  $V_{пр}$  зависит от температуры и от экземпляра фотодиода (разброс  $\pm 20\%$ ).

Температурную стабилизацию коэффициента  $M$  можно осуществить с помощью регулирующей схемы, изменяющей соответствующим образом напряжение на клеммах фотодиода при изменении температуры.

Темновой ток лавинных фотодиодов в  $M$  раз выше, чем у обычных фотодиодов, и растет с температурой. Чувствительность лавинного фотодиода также в  $M$  раз выше, чем у обычного. Быстродействие выше, так как емкость перехода уменьшается с ростом обратного напряжения.

Схема включения лавинного фотодиода аналогична схеме включения обычных фотодиодов в фотодиодном режиме. Большая чувствительность позволяет уменьшить  $R_{н}$ , повышая тем самым быстродействие.

## 9.5. Фототранзисторы

В фототранзисторе база освещается, а электрически к ней подсоединиться нельзя и питание подключают между коллектором и эмиттером (рис. 9.6, а).

Когда область около перехода база-коллектор освещается, транзистор ведет себя так же, как в фотодиодном режиме, а возникающий от освещения ток играет роль тока базы. Ток коллектора будет усиливаться в  $\sim \beta$  раз. Таким образом, фототранзистор можно рассматривать, как фотодиод, соединенный с транзистором (рис. 9.6, б).

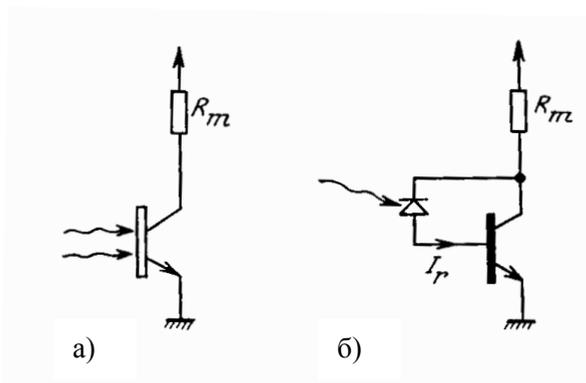


Рис. 9.6.

Темновой ток  $I_{K0}$  при  $25^{\circ}\text{C}$  имеет порядок  $10^{-8} \div 10^{-9}$  А; он зависит от напряжения коллектор-эмиттер и от температуры.

Семейство вольт-амперных характеристик фототранзистора выглядит так же, как и у обычного транзистора, только параметр  $I_B$ , нужно заменить падающим потоком или освещенностью.

Чувствительность фототранзисторов лежит в диапазоне от 1 до 100 А/Вт.

Быстродействие фототранзисторов зависит от его типа, рабочей точки и нагрузки и лежит в диапазоне от нескольких мкс до десятков мкс.

## 9.6. Фотоэмиссионные датчики

В датчиках этого типа оптический сигнал вызывает внешний фотоэффект. Он состоит в освобождении из твердого тела электронов, число которых пропорционально числу падающих фотонов. Первичные электроны образуют ток катода, который либо весь собирается анодом (в вакуумном фотоэлементе), либо служит источником дальнейшего процесса умножения (в фотоэлектронном умножителе).

### 9.6.1. Вакуумный фотоэлемент

Фотокатод и анод помещены внутри баллона с прозрачным окном, в котором поддерживается вакуум. Форма и размеры электродов обеспечивают прием максимального светового потока фотокатодом и сбор анодом всех эмитируемых фотокатодом электронов.

Схема включения фотоэлемента показана на рис. 9.7, а, вольт-амперные характеристики – на рис. 9.7, б.

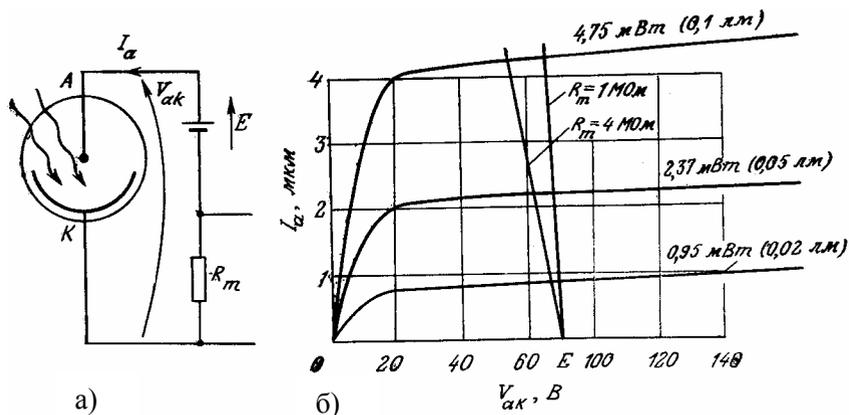


Рис. 9.7.

На этих кривых видны две области:

1. Область пространственного заряда, где ток анода быстро возрастает с ростом напряжения анод–катод  $V_{ак}$ . Часть электронов, эмитируемых фотокатодом, образует пространственный заряд, который, отталкивая вновь образуемые электроны, ограничивает анодный ток.

2. Область насыщения, где ток слабо зависит от напряжения  $V_{ак}$ : все носители заряда, эмитируемые фотокатодом, собираются анодом.

Именно области насыщения должна соответствовать нагрузочная прямая сопротивления  $R_H$ , уравнение которой  $I_a = (E - V_{ак}) / R_H$ .

В зоне насыщения вакуумный фотоэлемент можно считать источником тока, внутреннее сопротивление которого имеет порядок  $10^{10}$  Ом.

Темновой ток имеет порядок  $10^{-9} \div 10^{-10}$  А и вызывается двумя главными причинами: термоэлектронной эмиссией и токами утечки между электродами.

Спектральная чувствительность фотоэлемента зависит как от материала фотокатода, так и от материала баллона, поглощающего проходящий через него свет, и мало зависит от температуры. Обычно она лежит в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 0,2 до 1,0 мкм. Величина спектральной чувствительности в максимуме составляет  $10 \div 100$  мА/Вт.

Быстродействие фотоэлемента обычно определяется постоянными времени электронной схемы, связанной с ним.

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.

### 9.6.2. Газонаполненные фотоэлементы

Такие фотоэлементы устроены так же, как и вакуумные, но баллон наполнен разреженным газом (обычно аргоном) при давлении ( $10^{-1} \div 10^{-2}$  мм рт. ст.).

При достаточно большом анодном напряжении электроны, эмитируемые фотокатодом, производят ударную ионизацию атомов газа. В результате получается эффект умножения тока эмиссии фотокатода с коэффициентом умножения  $M = 5 \div 10$ .

Вольтамперные характеристики приведены на рис. 9.8, а. В области напряжений до 20В они такие же, как у вакуумных фотоэлементов, т. к. электроны недостаточно ускоряются, чтобы ионизировать газ. При напряжении выше 20В происходит ионизация газа, и процесс умножения электронов сильно зависит от величины напряжения (рис. 9.8, б). Анодное напряжение ограничивают величиной 90В, чтобы предотвратить начало самостоятельного разряда, приводящего к разрушению фотокатода.

Чувствительность этих фотоэлементов в  $5 \div 10$  раз выше, чем у вакуумных, и она возрастает с увеличением падающего светового потока, вследствие чего возникает нелинейность. Кроме того, чувствительность с течением времени уменьшается из-за деградации фотокатода под действием бомбардировки положительными ионами.

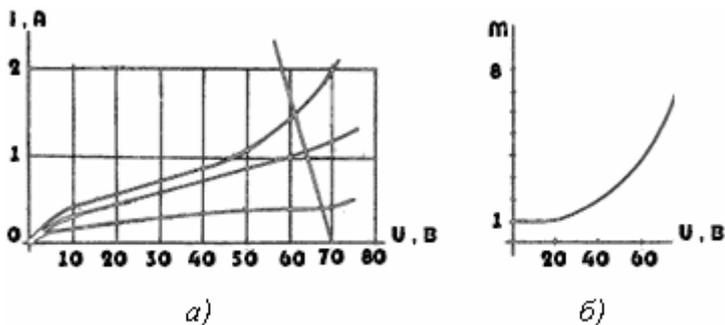


Рис. 9.8.

Быстродействие ограничивается увеличением времени пролета, определяемого соударениями электронов с атомами газа и малой подвижностью ионов. Время нарастания или спада сигнала имеет порядок миллисекунд.

Из-за перечисленных недостатков фотоэлементы этого типа предпочитают заменять фототранзисторами.

### 9.6.3. Фотоэлектронные умножители

Электроны, с высокой скоростью бомбардируя поверхность твердого тела, могут выбить электроны из поверхности. Это явление называется вторичной электронной эмиссией. Когда число эмитируемых электронов превышает число упавших, происходит усиление первоначального сигнала. Это явление используется в фотоэлектронных умножителях.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) состоит из колбы с вакуумом, в которой расположен фотокатод, ряд электродов (динодов) с последовательно увеличивающимся потенциалом на них, и анода (рис. 9.9).

Диноды покрыты материалом, обладающим высокой вторичной эмиссией электронов.

Первичный электронный сигнал состоит из электронов, эмитированных фотокатодом под действием падающего излучения. Эти электроны фокусируются электростатическим полем на первый динод, выбивая из него большее количество электронов, которые в свою очередь фокусируются на следующий динод и т. д. Если каждый электрон, бомбардируя динод, выбивает  $\delta$  электронов, а ФЭУ содержит  $n$  динодов, то коэффициент умножения числа электронов составит  $M = \delta^n$ . На самом деле не все электроны достигают динода, и величина коэффициента умножения получается несколько меньше. Обычно  $M$  лежит в диапазоне от  $10^6$  до  $10^8$ .

Преимущества ФЭУ, прежде всего, связаны с их высокой чувствительностью, малым шумом и высоким быстродействием (сотни мегагерц). Эти качества особенно подходят для обнаружения оптических сигналов очень малого уровня в таких областях, как астрономическая радиометрия, спектрофотометрия, лазерная телеметрия излучения, оптическая локация.

Однако значительные габариты, хрупкость, высокая стоимость и необходимость питания хорошо стабилизированным высоким напряжением (несколько киловольт) ограничивают возможность их применения.

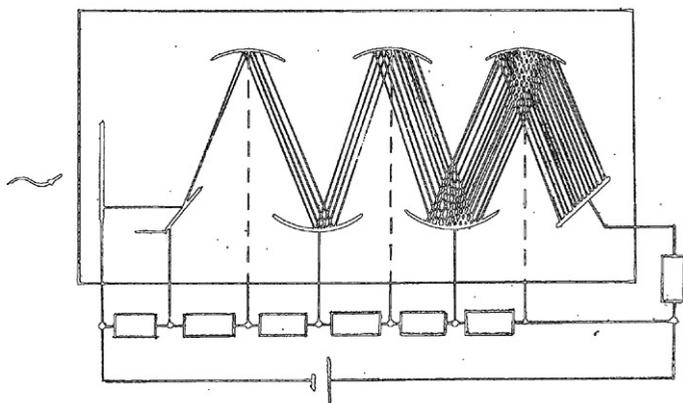


Рис. 9.9.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются световые единицы излучения от энергетических единиц?
2. Каков принцип действия фоторезистора?
3. Чем отличается фотодиодный режим работы фотодиода от фотогальванического режима?
4. Назовите принцип действия фототранзистора и его преимущества перед фотодиодом и фоторезистором.
5. Каков принцип действия вакуумного фотоэлемента?
6. Назовите принцип действия газонаполненного фотоэлемента.
7. Каков принцип действия ФЭУ? Назовите его преимущества и недостатки по сравнению с полупроводниковыми и вакуумными фотоэлементами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ\*

1. Аш Ш., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем. В 2 кн. – М.: – Мир, 1992 .
2. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Измерительные преобразователи. –Л.: Энергоиздат, 1983 г.
3. *Бриндли К. Измерительные преобразователи. –М.: Энергоатомиздат, 1991. 134 с.*
4. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. – М. –Л.: Энергия, 1975 .
5. *Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога. –М.: Додэка-XXI, 2002. 484 с.*
6. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология. –М.: ЛОТОС, 2001г.
7. Осипович А. А. Датчики физических величин. –М.: Машиностроение, 1979..
8. *Семёнов В. С. Датчики тепловых величин. –М.: МИФИ, 1982.*
9. *Семёнов В. С. Датчики механических величин и анализа состава вещества. –М.: МИФИ, 1984 .*
10. Карцев Е. А. Физические основы преобразования неэлектрических величин в электрические. –М.: МИЭМ, 2005. 159 с.
11. Никифоров А. Ю., Согоян А. В. Электронные датчики: преобразователи температуры, фотоприемники.–М.: МИФИ, 2005. 116 с.
12. Никифоров А. Ю., Согоян А. В., Бойченко Д. В. Электронные датчики: преобразователи ионизирующих излучений, механических величин, магнитного поля.–М.: МИФИ, 2005.196 с.
13. Азаров В. Н., Арменский Е. В., Рыбин В. М. Диагностика пучков заряженных частиц. –М.: Европейский центр по качеству, 2004. 178 с.

14. *Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. –М.: ЗАО Техносфера, 2005. 592 с.*
15. *Каталог Приборы и средства автоматизации.: Каталог. В 10 т. –М: Научтехиздат, 2006.*

---

\* Литература, напечатанная курсивом, является дополнительной.

## Приложение 1

### Некоторые термины и определения к ним из области метрологии (в соответствии с РМГ 29-99)

**1. Метрология.** Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

**2. Физическая величина.** Одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

**3. Измеряемая физическая величина.** Физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи.

**4. Значение физической величины.** Выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

**5. Истинное значение физической величины.** Значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

**6. Действительное значение физической величины.** Значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

**7. Влияющая физическая величина.** Физическая величина, оказывающая влияние на размер измеряемой величины и (или) результат измерений.

**8. Шкала физической величины.** Упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

**9. Единица измерения физической величины.** Физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

**10. Система единиц физических величин.** Совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин.

**11. Измерение физической величины.** Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение

соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

**12. Статическое измерение.** Измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

**13. Динамическое измерение.** Измерение меняющейся по размеру физической величины.

**14. Прямое измерение.** Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно.

Примеры:

- измерение длины детали микрометром;
- измерение силы тока амперметром;
- измерение массы на весах.

**15. Косвенное измерение.** Определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

**16. Абсолютное измерение.** Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Пример. Измерение силы  $F = mg$  основано на измерении основной величины – массы  $m$  и использовании физической постоянной  $g$  (в точке измерения массы).

**17. Относительное измерение.** Измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

**18. Измерительный сигнал.** Сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине.

**19. Измерительная информация.** Информация о значениях измеряемых физических величин.

**20. Объект измерения.** Тело (физическая система, процесс, явление и т. д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

**21. Средство измерений.** Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

**22. Мера физической величины.** Средство измерений,

предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

**23. Измерительный прибор.** Средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

**24. Измерительный преобразователь.** Техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

**25. Датчик.** Совокупность измерительных преобразователей, объединенных в единую конструкцию, расположенную непосредственно на объекте измерения, обязательно включающая в себя первичный измерительный преобразователь и имеющая на выходе измерительный сигнал.

**26. Измерительная цепь.** Совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода.

**27. Шкала средства измерений.** Часть показывающего устройства средства измерений, представляющая собой упорядоченный ряд отметок вместе со связанной с ними нумерацией.

**28. Метрологическая характеристика средства измерений.** Характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

Примечания:

а) для каждого типа средств измерений устанавливаются свои метрологические характеристики;

б) метрологические характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называют **нормируемыми метрологическими характеристиками**, а определяемые экспериментально – **действительными метрологическими характеристиками**.

**29. Диапазон измерений средства измерений.** Область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

**30. Чувствительность средства измерений.** Свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины.

**31. Порог чувствительности средства измерений.**

Характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

Примечание. Если самое незначительное изменение массы, которое вызывает перемещение стрелки весов, составляет 10 мг, то порог чувствительности весов равен 10 мг.

**32. Функция преобразования средства измерения.**

Зависимость выходной величины от входной измеряемой величины, выраженная в виде аналитической зависимости.

**33. Градуировочная характеристика средства измерения.**

Зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально.

**34. Принцип измерений.** Физическое явление или эффект, положенное в основу измерений.

Пример. Использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием.

**35. Результат измерения физической величины.**

Значение величины, полученное путем ее измерения.

**36. Погрешность средства измерений.**

Разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

**37. Систематическая погрешность средства измерений.**

Составляющая погрешности средства измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся.

**38. Случайная погрешность средства измерений.**

Составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом.

**39. Абсолютная погрешность средства измерений.**

Погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой физической величины.

**40. Относительная погрешность средства измерений.**

Погрешность средства измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к результату измерений или к действительному значению измеренной физической величины.

**41. Приведенная погрешность средства измерений.**

Относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона.

Примечания:

а) условно принятое значение величины называют нормирующим значением. Часто за нормирующее значение принимают верхний предел измерений;

б) приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

**42. Основная погрешность средства измерений.**

Погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

**43. Дополнительная погрешность средства измерений.**

Составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

**44. Нормируемые метрологические характеристики типа средства измерений.** Совокупность метрологических характеристик данного типа средств измерений, устанавливаемая нормативными документами на средства измерений.

*Валерий Павлович Михеев*  
*Антон Валерьевич Просандеев*

**Датчики и детекторы**  
*Учебное пособие*

Редактор Е.Е. Шумакова  
Корректор Н.Н. Смолина

Подписано в печать 30.10.2007. Формат 60x84 1/16.  
Печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 10,75. Тираж 200 экз.  
Изд. №4/30. Заказ № 0-642.

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет),  
115409, Москва, Каширское ш., 31.  
Типография издательства «Тривант»,  
г. Троицк Московской области