

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

## **ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ**

Конспект лекций

для студентов специальности:

1-38 01 01 Механические и электромеханические приборы и аппараты;

*Учебное электронное издание*

**М и н с к 2 0 1 2**

УДК 539.3(075.8)

**А в т о р :**

*А.А. Новиков*

**Р е ц е н з е н т ы :**

*Л.М. Акулович*, профессор кафедры «Технология металлов», БГТУ, доктор технических наук д.т.н., профессор ;

*Д.В. Василевский*, начальник лаборатории испытательного центра Научно-производственного республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации»

В конспекте лекций рассмотрены элементы приборных устройств, их типовые расчеты, структурные схемы приборов, первичные измерительные преобразователи применяемые в приборостроении. Конспект лекций предназначен для студентов специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» изучающих дисциплину «Элементы приборов».

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.(017)292-77-52 факс (017)292-91-37

E-mail: emd@bntu.by

<http://www.bntu.by/ru/struktura/facult/psf/>

Регистрационный № БНТУ/ПСФ80-8.2012

© Новиков А.А, 2012

© Новиков А.А., компьютерный дизайн, 2012

© БНТУ, 2012

## Содержание

Введение.....	5
Тема 1. Опоры и направляющие.....	6
1.1. Направляющие для вращательного и прямолинейного движения.....	6
1.1.1 Опоры с трением скольжения.....	6
1.1.2 Опоры с трением качения.....	10
1.1.3 Направляющие с трением скольжения.....	13
1.1.4 Направляющие с трением качения.....	14
1.1.5 Устройства для регулировки направляющих.....	15
1.1.6 Трение в направляющих.....	16
1.1.7 Температурное заклинивание.....	17
1.1.8 Износ направляющих.....	17
1.2 Гидростатические и гидродинамические опоры и направляющие.....	18
1.2.1 Гидродинамические подшипники.....	18
1.2.2 Гидростатические подшипники.....	18
1.2.3 Опоры с газовой смазкой (газостатические и газодинамические подшипники).....	20
1.3 Опоры и направляющие с трением упругости.....	21
1.4 Магнитные подвесы.....	23
Тема 2. Упругие элементы (оболочковые).....	25
2.1 Рабочие характеристики упругих элементов.....	25
2.2 Плоские мембраны.....	26
2.3 Гофрированные мембраны.....	27
2.4 Сильфоны.....	28
2.5 Манометрические трубчатые пружины.....	30
Тема 3. Ограничители движения.....	32
Тема 4. Регуляторы скорости.....	34
Тема 5. Успокоители (демпферы).....	37
Тема 6. Отсчетные устройства.....	39
6.1 Шкальные отсчетные устройства.....	39
6.2 Цифровые индикаторы. Классификация.....	41
Тема 7. Конструирование оптических деталей и узлов.....	43
Тема 8. Характеристики измерительных преобразователей.....	47
Тема 9. Структурные схемы приборов.....	50
9.1 Последовательная схема соединения преобразователей.....	50
9.2 Дифференциальная схема соединения преобразователей.....	51
9.3 Логометрическая схема соединения преобразователей.....	51
9.4 Компенсационная схема включения преобразователей.....	52
Тема 10. Измерительные схемы преобразователей.....	53
10.1 Схемы включения резистивных преобразователей.....	53
10.2 Тензорезистивные преобразователи.....	56
10.3 Терморезисторы.....	57
10.4 Индуктивные преобразователи.....	58

10.5	Трансформаторные первичные преобразователи.....	59
10.6	Емкостные преобразования.....	61
10.7	Пьезоэлектрические преобразователи .....	62
10.8	Индукционные преобразователи .....	63
Тема 11.	Компенсаторы и компенсационные схемы включения .....	64
11.1	Компенсатор постоянного тока .....	64
11.2	Автоматические компенсаторы постоянного тока.....	65
11.3	Компенсаторы переменного тока .....	66
Тема 12.	Измерительная информация. Методы её измерений и передач.....	68
12.1	Постоянный ток.....	68
12.2	Переменное синусоидальное напряжение.....	68
12.2.1	Амплитудная модуляция .....	68
12.2.2	Частотная модуляция.....	70
12.2.3	Фазовая модуляция .....	70
12.3	Импульсный ток или напряжение .....	71
12.3.1	Амплитудно-импульсная модуляция .....	71
12.3.2	Частотно-импульсная модуляция .....	72
12.3.3	Широтно-импульсная модуляция.....	72
12.2.4	Фазо-импульсная модуляция .....	73
12.2.5	Кодово-импульсная модуляция .....	74
Тема 13.	Фотоэлектрические преобразователи (оптоэлектронные) .....	76
13.1	Основные компоненты оптоэлектронных преобразователей.....	76
13.2	Источники излучения .....	77
13.2.1	Источники теплового излучения. ....	77
13.2.2	Люминесцентные источники излучения .....	78
13.3	Приёмники излучения .....	83
13.3.1	Параметры и приемников излучения. ....	83
13.3.2	Характеристики приемников излучения. ....	84
13.3.3	Фотоэлектрические приемники излучения .....	85
Литература.....		87

## Введение

При разработке, производстве и эксплуатации изделий различных отраслей промышленности необходим контроль определенных физических величин-параметров. Параметрами могут быть перемещения, ускорение, давление, угол поворота и т.д.

Контроль осуществляется при помощи средств измерений.

**Средство измерений** – средство, предназначенное для измерений, вырабатывающее сигнал, несущий информацию о значении измеряемой величины или воспроизводящие величину заданного размера. Сигналами могут быть ток, напряжение, импульсы, давление, перемещение, и т. д. Основой для создания средств измерений служит элементная база, которая и составляет предмет изучения курса.

**Элемент** представляет собой часть средства измерений (СИ), предназначенную для выполнения некоторых функций, но имеющую самостоятельного значения.

В зависимости от степени разделения СИ на составляющие элементы, могут являться: детали (пружины рычаги и т. д.), сборочные единицы (опоры, амортизаторы, успокоители) или целые приборы, (чувствительные элементы, датчики, усилители). Группа элементов, выполняющая определенную функцию, называется блоком, устройством или узлом прибора.

**Измерительный преобразователь** – средство измерений для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработке и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя.

**Первичным измерительным преобразователем (ПИП)** называется измерительный прибор, к которому подведена измеряемая величина.

ПИП подразделяют на параметрические (пассивные) и генераторные (активные).

ПИП преобразует неэлектрические входные величины (перемещение, скорость, давление) в параметры электрических цепей (сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , и емкость  $C$ ).

Каждый элемент прибора, так или иначе, преобразует входные величины в выходные. Преобразование происходит так, что выходная величина зависит от входной по определенному закону  $P_{\text{вых}} = f(P_{\text{вх}})$ . Этот закон называется функцией преобразования. Таким образом, элементы приборных устройств отличаются друг от друга, прежде всего функцией преобразования. Функция преобразования зависит, от характера информации на входе и выходе, т. е. от физического принципа, заложенного в основу построения данного элемента.

# Тема 1. Опоры и направляющие

## 1.1 Направляющие для вращательного и прямолинейного движения

*Направляющими* называют сборочные единицы, детали или отдельные их поверхности, которые обеспечивают перемещение других деталей или сборочных единиц в требуемом направлении.

Различают направляющие для поступательного движения в плоскости и направляющие для вращательного движения вокруг некоторой оси или точки (опоры). В зависимости от вида трения, возникающего при взаимном перемещении деталей направляющих, различают направляющие: с трением скольжения; с трением качения; с трением.

### 1.1.1 Опоры с трением скольжения

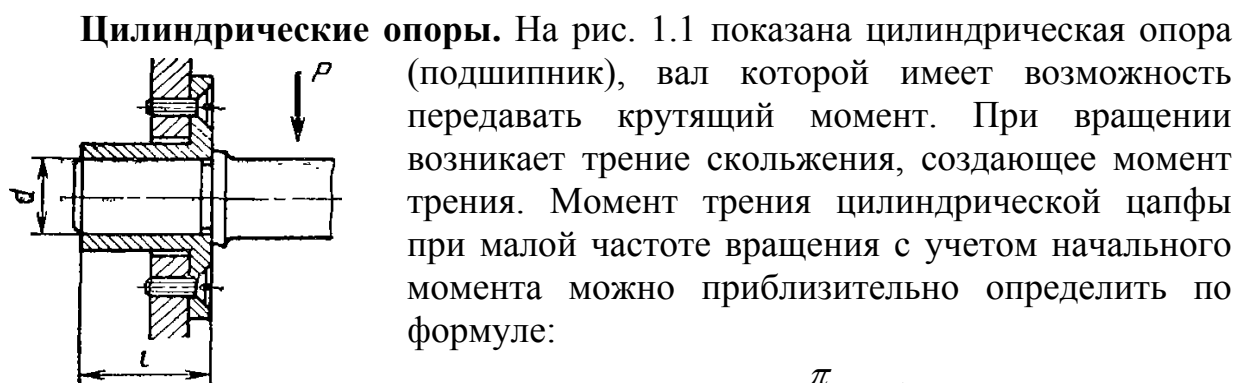


Рис. 1.1 Цилиндрическая опора

$$M = \frac{\pi}{4} \mu P d$$

где  $P$  – усилие;  
 $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  
 $d$  – диаметр вала.

В целях уменьшения трения и износа трущихся деталей в соединениях следует применять неоднородные металлы.

Нагруженные силой  $P$  валы проверяют на прочность (изгиб). Расчет на износ производят по удельному давлению  $q$ :

$$q = \frac{P}{d \cdot l}$$

Минимальный диаметр цапфы вала можно определить

$$d = \sqrt{\frac{Pl}{0,2R_B}}$$

Для предохранения от продольного перемещения валик снабжают заплечиками. При их отсутствии возможно заклинивание валика и преждевременный износ опоры (рис. 1.2 а). При заплечиках без фаски (рис. 1.2 б) трение сильно возрастает. С целью уменьшения трения и сохранения смазки у заплечиков снимаются фаски под углом  $45^\circ$  (рис. 1.2 в).

При вертикальном расположении осей опор действующие вертикально

усилия  $P_y$ , воспринимаются или кольцевой пятой  $A$  (рис. 1.3 а) или сплошной пятой (рис. 1.3 б).

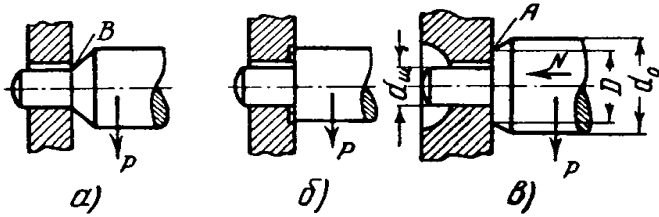


Рис. 1.2 Конструкции цилиндрических цапф.

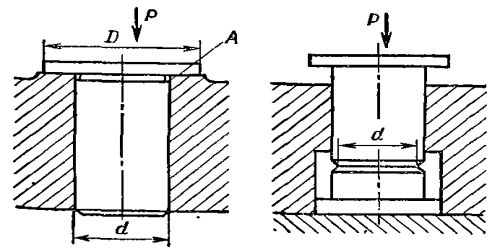


Рис. 1.3 Схемы для расчета момента трения в вертикальных направляющих

Момент трения в вертикальной опоре со сплошной пятой определяется:

$$M_{mp} = \frac{1}{3} \mu P d,$$

Момент трения в вертикальной опоре с кольцевой пятой рассчитывают по формуле;

$$M_{mp} = \frac{1}{3} \mu P \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2},$$

Виды крепления цилиндрических опор представлены на рис. 1.4.

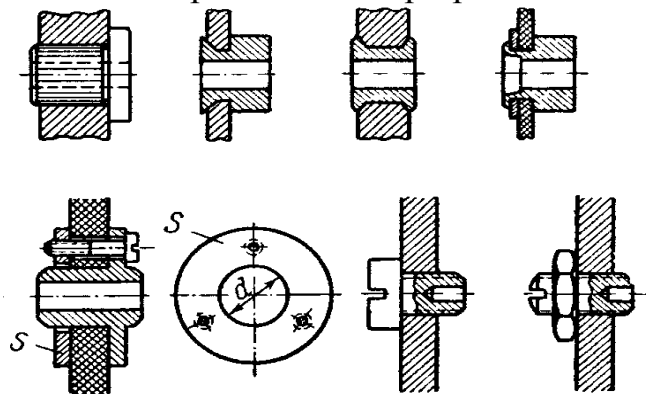


Рис. 1.4 Крепление цилиндрических опор в корпусе

**Достоинства:**

- + простота изготовления,
- + высокая прочность,
- + износоустойчивость,
- + могут воспринимать радиальные, осевые и комбинированные нагрузки.
- + в сравнении с другими видами опор скольжения допускают работу в большом диапазоне скоростей и нагрузок,
- + возможность работать в режима, как жидкостного трения, так и без смазки.

**Недостатки:**

- сложность конструкции регулировочных устройств;
- большой момент трения;
- большая разница между силами трения покоя и трения движения, что приводит к скачкообразному движению, особенно при малых скоростях;

- высокая чувствительность к несоосности отверстий.

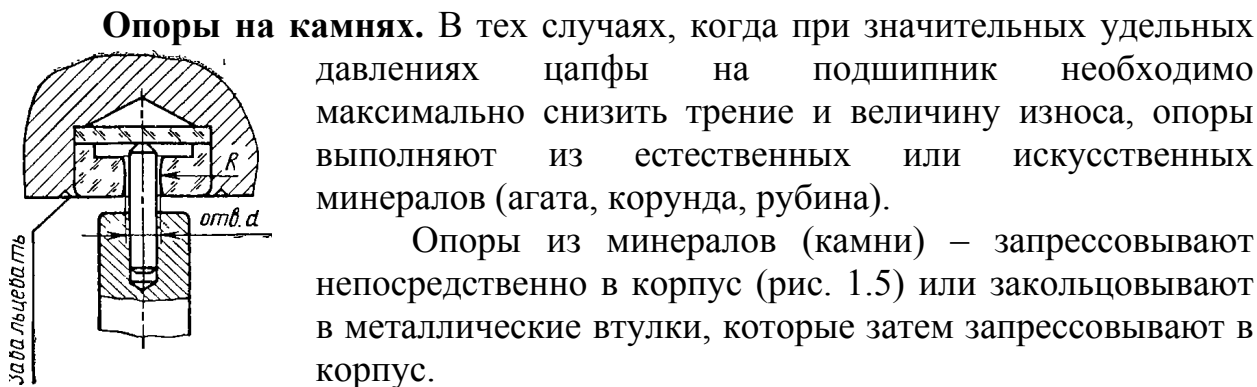


Рис. 1.5 Опора на камне

Опоры из минералов (камни) – запрессовывают непосредственно в корпус (рис. 1.5) или закольцовывают в металлические втулки, которые затем запрессовывают в корпус. Минералы в сравнении с другими материалами имеют большую твердость, износостойкость и обеспечивают сохранение физико-химических свойств смазки в течении длительного времени поскольку не вступают в химическое взаимодействие с металлом цапфы. Вследствие этого они имеют малый момент трения и большой срок службы.

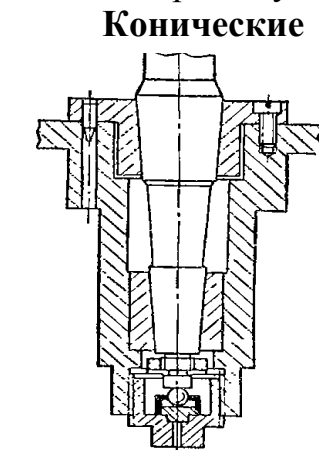


Рис. 1.6 Конические вертикальные опоры

**Конические опоры.** В точных приборах вертикальные цилиндрические направляющие заменяют коническими (рис. 1.6). Конические оси снабжены регулируемыми разгрузочными устройствами, которые устраняют заклинивание, компенсацию температурных изменений размеров, а так же дают выигрыш в легкости хода оси и долговечность работы прибора. Такие направляющие дороги в изготовлении, так как требуют индивидуальной притирки конусных поверхностей.

Момент трения конических направляющих значительно выше момента трения цилиндрических и зависит от угла конуса:

$$M_{тр.ц} = \mu N \frac{d}{2}; \quad M_{тр.к} = \mu \frac{P}{\sin \alpha} \frac{d_{cp}}{2}$$

где  $N$  – нормальное усилие,  $N = P/\sin \alpha$  ;  
 $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  
 $\alpha$  – половина угла конуса.

Из этой формулы видно, что с уменьшением угла  $\alpha$  момент трения возрастает. Угол  $\alpha$  не следует брать меньше чем  $2^{\circ}30'$  так как иначе неизбежно заклинивание оси в направляющей.

**Достоинства:** в сравнении с цилиндрическими они более износостойки и обладают лучшим центрированием оси.

- Недостатки:**
- сложны в изготовлении;
  - требуют индивидуальную притирку рабочих поверхностей;
  - чувствительность к изменению температуры;
  - возможность заклинивания;



- большой момент трения в сравнении с цилиндрическими опорами.

**Опоры на центрах** (рис.1.7) применяют в тех случаях, когда зазор между осью и опорой недопустим.

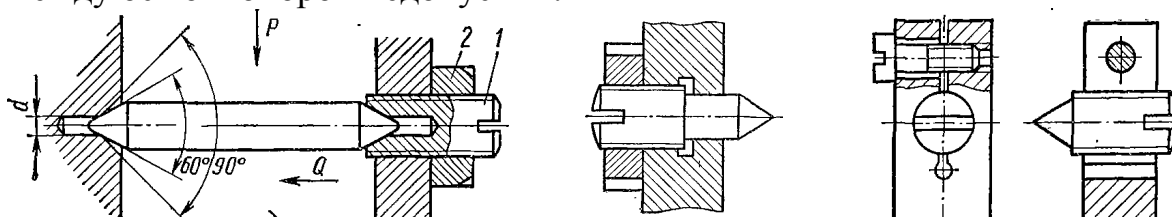


Рис. 1.7 Примеры опор на центрах

Для таких опор момент трения может быть рассчитан приближенно по формуле

$$M_{тр} = \frac{\pi}{3} \mu P d .$$

Конструкция опоры на центрах, приведенная на рис. 1.7, позволяет регулировать осевой зазор при помощи винта 1, который контрят гайкой 2. При работе прибора в условиях изменения температур осевое регулирование опор на центрах необходимо осуществлять при помощи пружин. Оси и конусы вкладышей обычно изготавливают из стали неподверженной коррозии и закаливают до твердости HRC 50...56. Смазка в опорах не применяется, т.к. при малой опорной поверхности и большом давлении смазка выдавливается из точки контакта.

Опоры на центрах можно использовать лишь при малой частоте вращения оси и небольших нагрузках, вследствие больших контактных напряжений.

Расчет опор этого типа производится на момент трения и контактную прочность.

**Опоры на кернях** представляют частный случай опор на центрах (рис. 1.8).

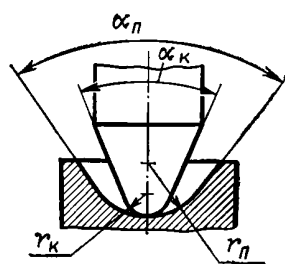


Рис. 1.8 Опора на кернях

Они состоят из цапфы конической формы, на конце которой выполнена сферическая полированная поверхность малого радиуса  $r_k=0,01-0,05$  мм и подшипника с конической вогнутой поверхностью радиусом  $r_n=4-12r_k$ . Иногда делают со сферической вогнутой поверхностью.

Контакт цапфы и подшипника происходит в точке, поэтому опоры имеют малый момент трения и применяются при незначительных нагрузках и малых частотах вращения. Опоры применяются как при вертикальном, так и при горизонтальном положении оси.

Керны и подшипники стандартизованы (ГОСТ 8898-68, ГОСТ 893-68). В качестве материалов кернов применяются инструментальные стали У8А, У10А, У12А, а подшипник их минералов и специальных видов стекл.

Момент сил трения при вертикальном положении оси определяется по формуле:

$$M_{\text{тр}} = \frac{3}{4} \pi \mu P a = 0,407 \frac{P}{\sqrt{\sigma_{\text{max}}}}$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  
 $P$  – осевая нагрузка;  
 $a$  – радиус площадки соприкосновения керна с подшипником;  
 $\sigma_{\text{max}}$  – максимальные контактные напряжения на площадке соприкосновения керна с подпятником.

Так же при проектировании опор на кернах рассчитывают контактную прочность керна и подшипника.

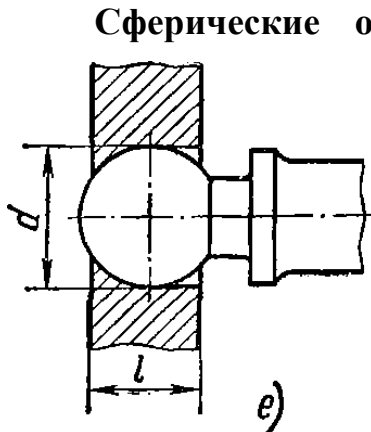


Рис. 1.9 Сферическая опора

где  $R_B = (400—600) 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $q = (40—80) 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

Конструктивно сферическую цапфу выполняют как одно целое с валом или в виде отдельного шарика закрепленного на торце вала или оси. Опорные поверхности подушек малонагруженных опор можно изготавливать не сферическими, а конусными с углом  $90^\circ$ . Такие опоры проще в изготовлении.

Материалы для сферических цапф – углеродистая инструментальная сталь. Для вставных шариков – ШХ10, ШХ15. Опоры изготавливают из коррозионностойких материалов, иногда из минералов и керамики.

### 1.1.2 Опоры с трением качения

К опорам с трением качения относятся: опоры на шарикоподшипниках, опоры с насыпными шариками и опоры на ножах.

Опоры с трением качения характеризуются тем, что между осью и стенками направляющего отверстия втулки помещаются промежуточные тела качения. Для правильного направления их и распределения по окружности применяют сепараторы.

#### Достоинства:

- + хорошие характеристики трения, равномерность и плавность движения при малых скоростях,
- + высокая точность установочных перемещений,
- + малые потери на трение, небольшое тепловыделение,

- + простота системы смазки.
- + нечувствительны или малочувствительны к температурным изменениям.

**Недостатки:**

- высокая стоимость,
- высокая трудоемкость изготовления,
- низкое депфрирование,
- повышенная чувствительность к загрязнению.

**Насыпные шарикоподшипники (опоры на шариках)** (рис. 1.10) применяются в тех случаях, когда нормальные шарикоподшипники нельзя применить из-за сравнительно большого наружного диаметра или по каким-либо иным конструктивным соображениям. В большинстве случаев шариковые опоры не имеют сепараторов, так как шарики, совершая сложные движения должны лежать свободно.

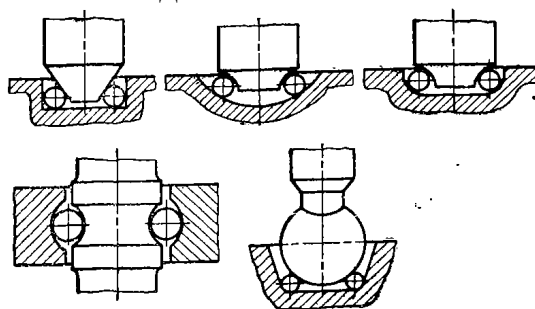
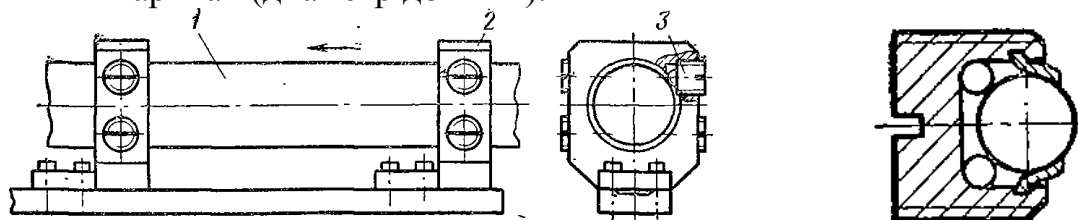


Рис. 1.10 Конструкции опор на шариках

В зависимости от формы наружных, внутренних или опорных колец шарики насыпных шарикоподшипников могут иметь три или четыре точки касания с опорными поверхностями беговых дорожек (канавок)

Оригинальная конструкция опоры на шариках изображена на рис. 1.11. Ось 1 опирается на два кронштейна 2. В каждый кронштейн ввинчены специальные оправы 3 с шариками 4. Шариками 4 в оправках 3 лежат на маленьких шариках (диаметр до 1 мм).



а — общий вид; б — специальная оправка с шариками;

Рис. 1.11 Опора на шариках

Во всех конструкциях насыпных шарикоподшипников наиболее трудоемким является изготовление наружных и внутренних колец. При этом необходимо выдержать жесткие допуски по 1 и 2-му классам точности, обеспечить минимальные радиальные биения, шлифовать и полировать рабочие поверхности. Для таких подшипников используют калиброванные шарики.

**Опоры на ножах** используют в чувствительных измерительных приборах и в весах различного типа.

Опоры на ножах относят к опорам скольжения открытого типа, так как во всех вариантах исполнения таких опор происходит контакт двух цилиндров.

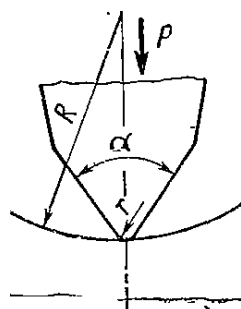


Рис. 1.12 Схема опоры на ноже

Основными элементами опоры являются подушка и нож. Радиус  $R$  углубления подушки должен быть намного больше радиуса закругления  $r$  кромки ножа (рис. 1.12).

В ножевых опорах для весов нож затачивают тем острее, чем чувствительнее должны быть весы, при этом значительно возрастает удельная нагрузка на опору. Ножи для точных весов выполняют в виде трехгранной призмы, а для более грубых устройств – грушеобразной, квадратной, многогранной формы в поперечном сечении. Выбор формы определяется значением нагрузки.

Ножи следует жестко закреплять на рычагах или коромыслах, а опорные подушки на стойке штатива или подвесках (рис.1.13).

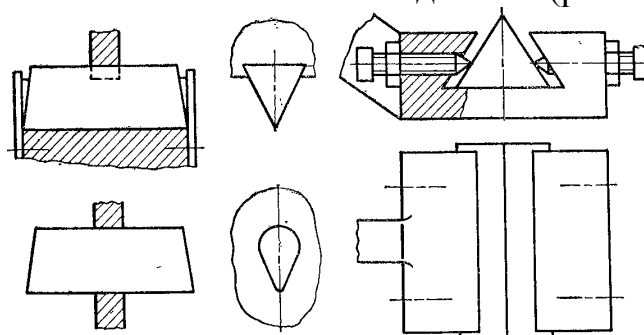


Рис. 1.13 Примеры крепления ножей

Опорные подушки запрессовывают в соответствующие детали (рис. 1.14, а). По конструктивным соображениям иногда подушки делают из двух частей (рис. 1.14, д). В этом случае после установки обеих частей на одном основании их совместно шлифуют.

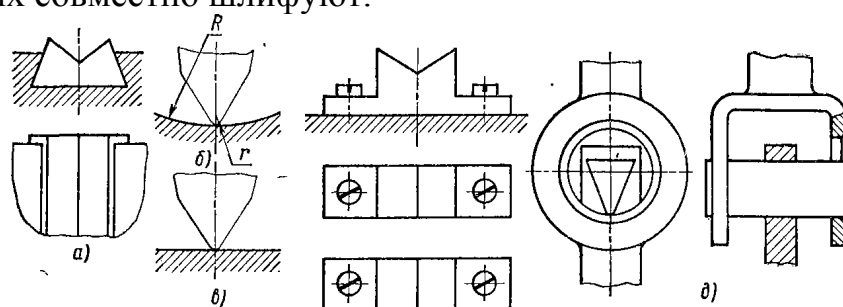


Рис. 1.14 Виды опорных подушек

Допустимое напряжение в материале в зависимости от нагрузки на опору и размеров ножа можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$\sigma = 0,175 \frac{PE}{lr}$$

где  $P$  – нагрузка;  $E$  – модуль упругости материала, из которого сделан нож;  $l$  – длина ножа;  $r$  – радиус закругления рабочей кромки.

Для ножей и подушек применяют закаленную сталь и некоторые минералы (агат, корунд). Во всех случаях для опорных подушек следует

применять более твердый материал, чем для ножей.

### 1.1.3 Направляющие с трением скольжения

В направляющих для прямолинейного перемещения относительное движение звеньев является прямолинейное поступательное (т.е. траектории различных точек подвижного звена представляют собой параллельные прямые).

К направляющим прямолинейного движения предъявляются следующие требования:

- точность перемещения подвижного узла,
- эксплуатационная долговечность (малый износ),
- высокая жесткость,
- высокие демпфирующие свойства,
- малые силы трения.
- простота конструкции и изготовления,
- близость тягового устройства к центру тяжести,
- возможность регулировки зазора, натяга,
- благоприятное расположение в рабочем пространстве.

Направляющие для прямолинейного перемещения обладают такими же достоинствами и недостатками как и аналогичные им опоры.

При функционировании направляющих взаимная ориентация деталей может осуществляться за счет внешней силы или за счет замыкания формой деталей направляющей. В первом случае направляющие называют – *открытыми с силовым замыканием* (рис. 1.15 а, в), применяются в основном в стационарных приборах; во втором случае – *замкнутыми с геометрическим замыканием* (рис. 1.15 б, г), функционируют независимо от направления действующих сил.

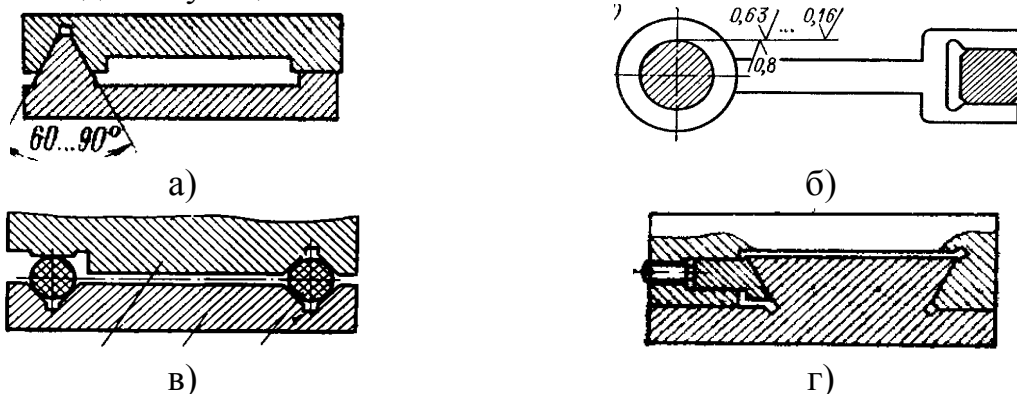


Рис. 1.15 Типовые схемы направляющих скольжения

Так же направляющие классифицированы по виду трения:

- 1) направляющие с трением скольжения: по цилиндрическим, по призматическим Н, Т, V, П- образным или комбинированным поверхностям, ласточкин хвост;
- 2) направляющие с трением качения: на шариках, на роликах или иголках;
- 3) направляющие с внутренним трением (упругие).

В некоторых конструкциях, направляющую и опорную поверхности совмещают в одной детали, как показано на рис. 1.16 Для предотвращения

проворачивания служат дополнительные детали.

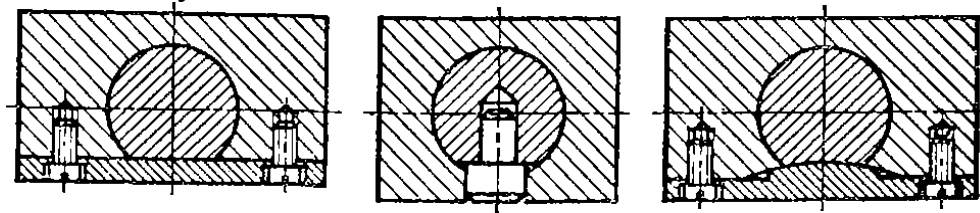


Рис. 1.16 Цилиндрические совмещенные направляющие

К направляющим с трением скольжения как с цилиндрическими, так и с плоскими поверхностями предъявляют повышенные требования в отношении точности, легкости и плавности хода, наименьшей величины трения. Это обеспечивается точностью выполнения размеров, заданием допусков на геометрические формы направляющих поверхностей. При выполнении этих требований необходимо учитывать температурные влияния, вызывающие линейные изменения размеров сопрягающихся деталей.

#### 1.1.4 Направляющие с трением качения

Направляющие этого вида (рис.1.17) применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить легкость и плавность движения. Они нечувствительны или малочувствительны к температурным изменениям.

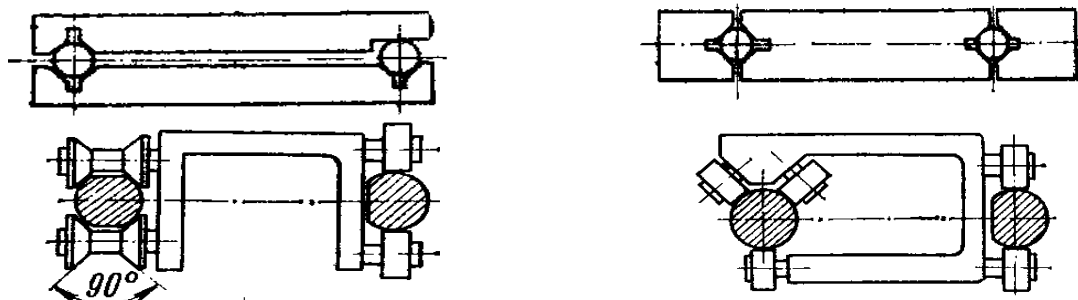


Рис. 1.17 Примеры направляющих качения для прямолинейного движения

Направляющие с трением качения делят на направляющие:

- а) с шарико- и роликоподшипниками
- б) с насыпными шариками или роликами.

В роликовых направляющих основной деталью является ролик, который может передвигаться по направляющим, выполненным в виде цилиндра (рис. 1.18 а), либо по плоской поверхности (рис. 1.18 б). В таких роликовых направляющих, для обеспечения возможности регулирования необходимо применять ролики с эксцентричными осями.

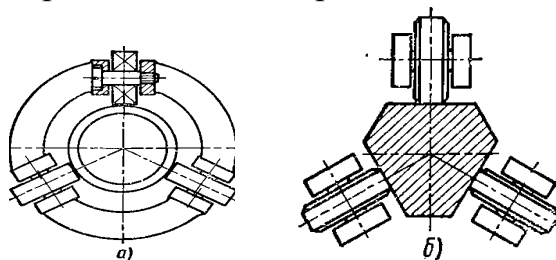


Рис. 1.18 Роликовые направляющие

В ряде приборов для уменьшения трения и обеспечения легкости хода целесообразно заменять ролики стандартными радиальными шарикоподшипниками малых размеров.

В зависимости от способа установки шариков различают направляющие с перекатывающимися и вращающимися вокруг своей оси шариками. В первом случае при перемещении каретки шарики перекатываются по основанию и оси тел качения перемещаются как относительно каретки, так и относительно основания (рис. 1.19 *а*). Во втором случае тела качения закреплены на осях и при перемещении каретки вращаются в своих гнездах, а оси тел остаются неподвижными относительно каретки и основания (рис. 1.19 *б*).

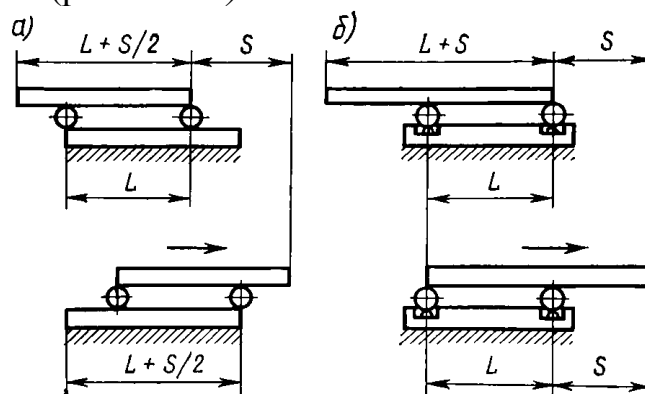


Рис. 1.19 Схемы установки тел вращения в направляющих

При сравнении двух систем направляющих видно, что теоретическая длина каретки и основания в случае применения перекатывающихся шариков  $L + S/2$ , где  $L$  — расстояние между центрами вращающихся шариков, а  $S$  — ход каретки. В случае вращающихся шариков длина каретки и основания равна  $L + S$ . Таким образом, при проектировании приборных устройств с большим ходом каретки более целесообразна конструкция, в которой тела качения перемещаются вместе с подвижной кареткой, это позволяет уменьшить ее длину. С другой стороны, при установке шариков во вращающихся гнездах исключается влияние погрешности формы поверхности основания, поэтому такие направляющие при прочих равных условиях обеспечивают более высокую точность перемещения каретки.

### 1.1.5 Устройства для регулировки направляющих

При изготовлении деталей направляющих неизбежны погрешности размеров, формы, расположения поверхностей. В следствии этого при сборке появляются люфты снижающие точность перемещения или увеличивающие усилие перемещения «натяги» и износ. Поэтому, для создания работоспособной конструкции используются регулировочные устройства.

На рисунке 1.20 *а* показана выборка зазора в направляющих путем завинчивания регулировочного винта. На рисунке 1.20 *б* показана конструкция с силовой пружиной выбирающей зазор.

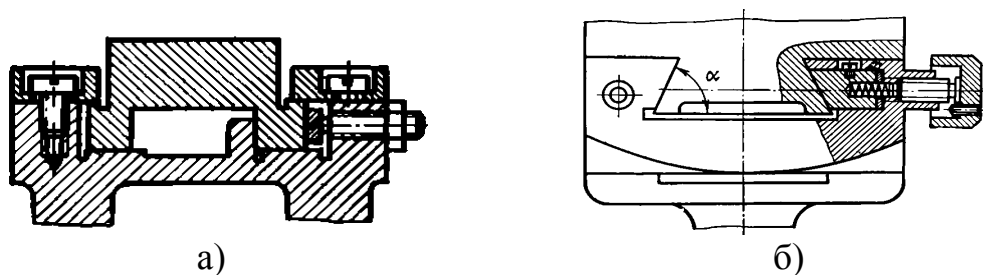


Рис. 1.20 Способы регулировки зазора в направляющих.

### 1.1.6 Трение в направляющих

При конструировании направляющих производится расчет сил сопротивления движению ползуна. Это необходимо для:

- а) расчета требуемого усилия пружины, осуществляющей силовое замыкание с приводом направляющей;
- б) расчета приведенного момента на валу ручного или электромеханического привода;
- в) обеспечения плавности движения и отсутствия силового заклинивания.

При отсутствии действия внешних сил сопротивление движению ползуна в направляющей характеризуется силой трения  $Q$ , возникающей под действием массы ползуна  $S_1$  и располагаемого на нем груза  $S_2$ . Для приведения в движение ползуна необходимо приложить внешнюю силу  $R$ , которая должна быть больше силы трения  $Q$ . При расчете силы  $R$  можно составить две схемы:

- точка приложения силы расположена в средней плоскости направляющей под некоторым углом  $\alpha$  к этой плоскости (рис. 1.21 а);
- точка приложения и сама сила находятся в параллельной плоскости, отстоящей от средней на длину  $l$  (рис. 1.21 б).

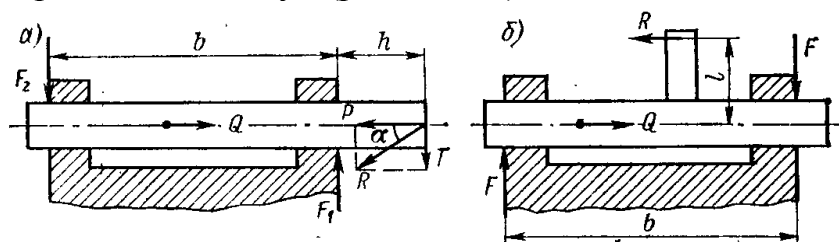


Рис. 1.21 Схема действия сил на направляющую

В случае, когда внешняя сила  $R$  не способна привести ползун в движение, говорят о силовом заклинивании. Следует различать также температурное заклинивание, которое получается при больших перепадах температур, при неправильно выбранных материалах деталей и вида посадки сопрягаемых поверхностей.

Условие отсутствия силового заклинивания для первой расчетной схемы выглядит следующим образом:

$$\frac{b}{h} > \frac{2\mu \operatorname{tg} \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha}$$



Из формулы видно, что наличие или отсутствие заклинивания не зависит от значения силы  $R$ , а определяется только конструктивными параметрами – базой  $b$ , плечом  $h$  и углом действия силы  $\alpha$ .

Во второй расчетной схеме, сила  $R$  создает опрокидывающий момент  $M = Rl$ , уравновешивающийся моментом пары сил реакции в опорах, т. е.  $Rl = Fb$ . Реакция опор создает силу трения в направляющих:

$$Q = 2F\mu = \frac{2Rl}{b}\mu$$

Условие отсутствия заклинивания  $R > Q$  можно выразить через конструктивные параметры  $R > \frac{2Rl}{b}$ .

### 1.1.7 Температурное заклинивание

Для приборов, работающих при значительных колебаниях температуры окружающей среды, следует производить расчеты на возможность температурного заклинивания при неправильном выборе посадки сопрягаемых поверхностей и их материала: Расчет ведется по следующей формуле:

$$\Delta C = \Delta C_0 + (\alpha_1 + \alpha_2)D\Delta t$$

$\Delta C_0$  – зазор при нормальных условиях работы направляющей;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты линейного расширения направляющей и втулки

$D$  – диаметр направляющей;

$\Delta t$  – изменение температуры

### 1.1.8 Износ направляющих

Износ направляющих зависит от удельного давления контактирующих пар деталей, коэффициента трения материалов, их твердости и качества обработки, а также от свойств смазочных материалов, заполняющих зазор в направляющих.

Проверка удельного давления производится по формуле:

$$q = N/S < [q]$$

где  $N$  – нормальное давление;

$S$  – площадь контакта сопрягаемых пар деталей;

$[q]$  – допустимое удельное давление.

## 1.2 Гидростатические и гидродинамические опоры и направляющие

Когда в процессе работы смазка полностью разделяет трущиеся поверхности, то такое трение называется жидкостное. При использовании жидкостной смазки в опорах скольжения зависимости различают гидродинамический и гидростатический способы смазывания.

### 1.2.1 Гидродинамические подшипники

Гидродинамическое смазывание реализуется в процессе вращения цапфы в подшипнике после достижения определённой (критической) скорости вращения (рис. 1.22). Первоначально цапфа неподвижного вала лежит на поверхности подшипника (рис. 1.22 а), и потому начальный период вращения вала характеризуется режимом граничного трения. По мере увеличения угловой скорости вала частицы смазочного масла втягиваются в клиновидный зазор между поверхностями цапфы и подшипника. Давление масла в этом зазоре повышается и при достижении критической скорости вращения вала, цапфа всплывает, т.е. происходит полное разделение трущихся поверхностей.

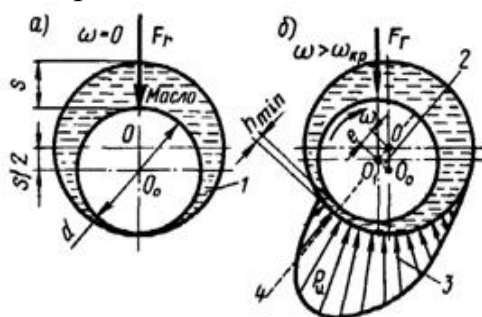


Рис. 1.22 Гидродинамическая смазка подшипника скольжения

Среднее давление, развивающееся в клиновом зазоре, прямо пропорционально динамической вязкости масла, частоте вращения вала и обратно пропорционально толщине масляного слоя. Такая зависимость способствует саморегулированию толщины смазочного слоя от действующей на цапфу вала нагрузки. Давление в клиновом слое может достигать больших величин, и поэтому подача масла производится в зону разрежения, что не требует больших затрат мощности на смазывание и системы смазки высокого давления. Упорные гидродинамические опоры выполняются многоклиновыми со специальными скосами.

#### Недостатки гидродинамических опор:

- нестабильность положения оси вала при изменении скорости вращения;
- повышенный износ в момент пуска и остановки;
- сложность конструкции, создание систем для подкачки масла и удерживание его в опоре (герметизация);
- сложность изготовления, монтажа, эксплуатации.

### 1.2.2 Гидростатические подшипники

Принцип действия гидростатического подшипника (рис. 1.23) основан на том, что при прокачивании масла под давлением от источника питания (наноса) через зазоры между цапфой вала и подшипником, в зазоре образуется несущий

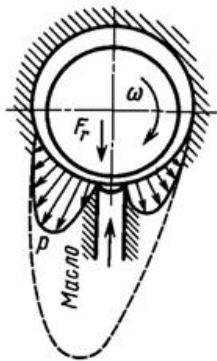


Рис. 1.23 Гидростатическая смазка подшипника скольжения

дресселей на входе в каждый карман. Разность давлений создаёт результирующую силу  $F_r$  воспринимающую внешнюю нагрузку. Отвод масла обычно производится через торцы подшипника, а иногда через дренажные канавки, выполненные на перемычках между карманами.

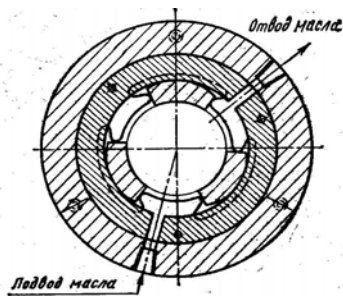


Рис. 1.24 Гидродинамический подшипник

масляный слой, который исключает непосредственный контакт поверхностей. В радиальных подшипниках равномерно по окружности делают полости-карманы, куда через дроссели подаётся под давлением масло от насоса. При приложении внешней нагрузки вал занимает эксцентричное положение, зазоры  $h$  в подшипнике перераспределяются, что приводит к увеличению давления  $p$  масла в одних карманах и уменьшению в противоположных. Уравнения давлений в карманах не происходит вследствие наличия

В гидростатических подшипниках масло подаётся навстречу основным нагрузкам (рис. 1.24), действующим на цапфу вала, а давление насоса выбирается таким, чтобы цапфа вала всплывала на слое смазки. Применяются в тихоходных тяжело нагруженных валов, для гидростатической центровки валов в прецизионных машинах, а также в периоды разгона до достижения гидродинамического режима смазывания.

#### Достоинства гидростатических опор:

- + обеспечивают высокую точность вращения,
- + обладают высокой демпфирующей способностью, что повышает виброустойчивость направляющего узла,
- + долговечны, отсутствие износа рабочих поверхностей;
- + высокая плавность хода,
- + высокая нагрузочная способность при любой частоте вращения вала;
- + возможно использование в системах адаптивного управления, в качестве датчиков силы, приводов микроперемещений и д.р.

#### Недостатки:

- сложность конструкции, создание систем для подкачки масла и удерживание его в опоре;
- ограниченный температурный диапазон работы (предварительный разогрев или охлаждение смазки),
- требование герметизации.

Этих недостатков лишены опоры и направляющие с газовой смазкой.

По конструкции направляющие с жидкостным трением могут быть: цилиндрические, призматические, профильные.

### 1.2.3 Опоры с газовой смазкой (газостатические и газодинамические подшипники)

Направляющими с газовой смазкой называются опоры скольжения, в которых между трущимися поверхностями находится слой газа, препятствующий их контакту. Несущая способность опор этого типа, как и у опор с жидким трением, создается либо за счет внешнего нагнетания (наддува) газа в рабочий зазор (газостатические опоры), либо за счет нагнетания газа в зазор вследствие большой скорости относительного движения одной из рабочих поверхностей (газодинамические опоры). Они могут служить в качестве направляющих как вращательного, так и поступательного движения.

**Достоинства** опор с газовой смазкой:

- + широкие возможности выбора материалов для трущихся поверхностей;
- + простота конструктивного оформления опор;
- + бесшумность работы;
- + высокая точность положения подвижной части;
- + малые потери на трение (трение газа);
- + высокую плавность хода
- + высокая износостойкость;
- + возможность работы в условиях резкого перепада температур;
- + долговечность (отсутствие износа)
- + возможность использования в устройствах, где следы смазки и продукты ее использования недопустимы

**К недостаткам** газовых подшипников относятся

- высокие требования к геометрическим размерам трущихся поверхностей и к чистоте их обработки,
- сложность технологического обеспечения работы опор,
- опасность возникновения вибраций вала, вызванной неточным изготовлением и балансировкой вращающегося вала, борьба с явлением самовозбуждения колебаний вала скоростным вихрем и другими видами вибраций.
- малая несущая способность.
- необходимость изменения зазора в зависимости от нагрузки и рабочего давления воздуха (газостатические).

В качестве рабочей среды используется очищенный и осушенный воздух или инертный газ с повышенным давлением 0,3-1 МПа. Частота вращения вала высокая от 100 000 до 300 000 мин<sup>-1</sup>.

**Конструктивные схемы опор и направляющих с газовой смазкой**

Газостатические опоры, как и опоры скольжения, конструктивно отличаются по геометрической конфигурации (рис. 1.25) рабочих поверхностей (плоские, конические, сферические) и по типу ограничителей расхода воздуха (нерегулируемых или автоматически регулируемых давлением в рабочем зазоре).

Цилиндрические газовые опоры требуют тщательного исполнения

геометрии цапфы и подшипников.

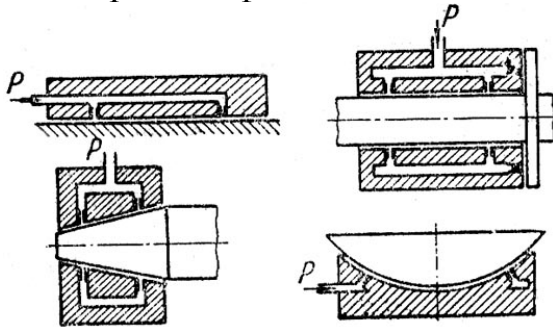


Рис. 1.25 Виды газовых опор

В ряде случаев в приборах могут быть применены конические газовые подшипники с углами конусов 60 и 120°, или сферические, что позволяет устранить необходимость в упорных подшипниках. Их достоинство заключается в том, что опоры допускают регулировку суммарного рабочего зазора за счет смещения

одной из опор вдоль оси вращения.

Конструктивные исполнения газодинамических опор отличается от газостатических. Для обеспечения их работы на рабочих поверхностях цапф выполняются продольные канавки, ступеньки, карманы, спиральные канавки.

### 1.3 Опоры и направляющие с трением упругости

Применение упругих элементов в качестве опор подвижных систем, находящихся во вращательном (колебательном) или поступательном движении, дает возможность заменить трение скольжения или качения трением упругости. Применение опор с трением упругости упрощает конструкцию приборов, так как, выполняя одновременно роль упругих элементов, они создают необходимый противодействующий момент или служат для выбора мертвых ходов.

#### Достоинства:

- + отсутствует трение (значение трения упругости мало) и зазоры;
- + исключается необходимость в смазке;
- + нечувствительность к загрязнениям;
- + надежны в работе.

#### Недостатки:

- пониженная виброустойчивость;
- недостаточная точность центрирования;
- ограниченность линейных и угловых перемещений.

Различают следующие виды опор с трением упругости.

**Растяжки.** Под опорой на растяжке понимается установка подвижной части

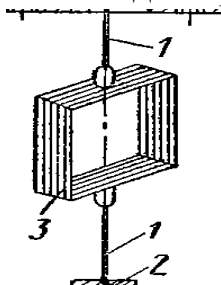


Рис. 1.26 Схема крепления рамки на упругих растяжках

прибора (рамки) на растянутой нити с двумя закрепленными концами (рис. 1.26). При повороте моментом  $M$ , подвижного звена в следствии закручивания нити возникает противодействующий уравнивающий момент  $M_2$ . При необходимости нить может быть использована для подвода тока.

При малой массе подвижного звена и достаточном усилии натяжения растяжки, опоры

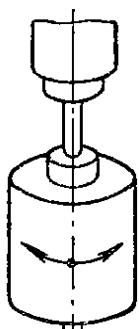


Рис. 1.27 Крепление подвижной системы на торсионе

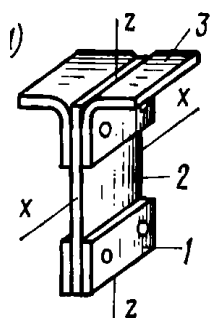


Рис. 1.28 Виды пластинчатых подвесов

этого типа могут применяться и для горизонтального растяжения оси вращения.

**Торсионный подвес** (рис. 1.27). Ось вращения может располагаться как вертикально так и горизонтально. Точность центрирования зависит от конструкции заделки торсиона (обычно точность не высокая).

**Подвесы пластинчатого типа, работающие на изгиб** (рис. 1.28). Представляют собой пластинчатые пружины 1 одним концом закрепленные к неподвижной, а другим концом к подвижной части прибора. В результате подвижную часть можно смещать в одном. **Недостаток** – заметное смещение центра вращения в пределах рабочего угла поворота.

Указанное смещение уменьшается в двухпластинчатых крестообразных упругих опорах (рис. 1.29 а). В таких опорах при малых углах поворота центр вращения совпадает с линией пересечения плоскостей пружин. Радиальная упругая опора (рис. 1.29 б) конструктивно более сложная. Она имеет практически постоянный центр поворота и воспринимает радиальные усилия в любом направлении. **Недостаток** такой опоры в том, что она работает при весьма ограниченных углах поворота и имеет жесткость, возрастающую при увеличении поворота.

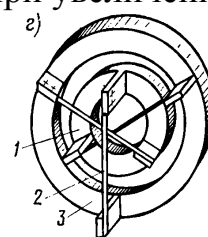
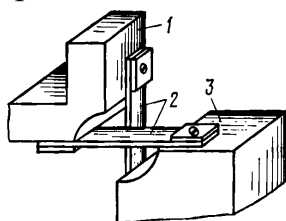
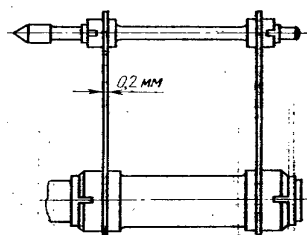


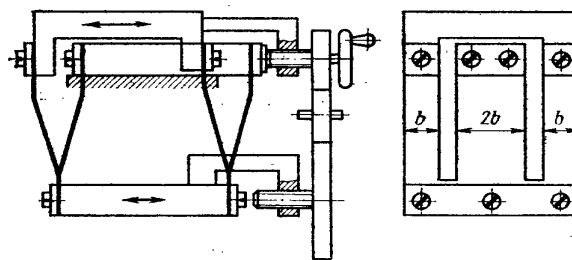
Рис. 1.29 Двух и трех пластинчатые подвесы

### Направляющие прямолинейного движения с трением упругости.

На рис. 1.30 показаны направляющие для поступательного движения созданные из блока рамочных пружин: а – упругий параллелограмм; б – сдвоенный упругий параллелограмм.



а)



б)

Рис. 1.30 Применение пружин в качестве направляющих

## 1.4 Магнитные подвесы

Состояние, при котором твердое тело "парит" в силовом поле подвеса без какого-либо механического контакта с окружающими телами, называется левитацией. Бесконтактный подвес радикально решает проблему трения и позволяет создавать "вечные" подшипники, которые не будут претерпевать износа во все время эксплуатации.

Теорема ИРНШОУ – запрещает существование устойчивого равновесия электрических зарядов под действием одних только электрических сил. Физический смысл этой теоремы в следующем: разноименные заряды притягиваются со все возрастающей силой вплоть до взаимной нейтрализации или уничтожения, одноименные же отталкиваются вплоть до удаления в бесконечность.

Электрические и магнитные подвесы, в зависимости от принципа действия, принято разбивать на девять типов:

- электростатические;
- на постоянных магнитах;
- активные магнитные;
- LC- резонансные; индукционные;
- индукционные;
- кондукционные;
- диамагнитные;
- сверхпроводящие;
- магнитогидродинамические.

При сравнении преимуществ и недостатков различных типов электромагнитных подвесов наибольший практический интерес в смысле широкого промышленного использования представляет активный магнитный подвес.

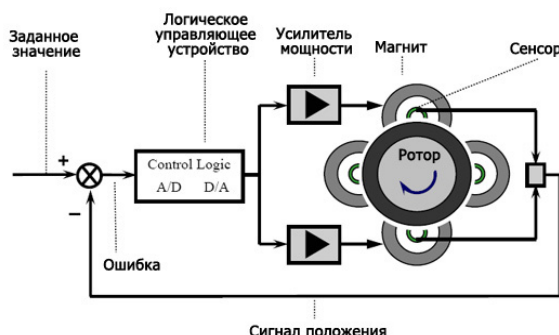


Рис. 1.31 Принципиальная схема управления типичной системы на основе активного магнитного подшипника

Суть работы активного магнитного подвеса сводится к следующему (рис. 1.31). Датчик (сенсор) измеряет смещение подвешиваемого ферромагнитного тела (ротора) из заданного положения равновесия. Сигнал измерения обрабатывается логическим устройством. Усилитель мощности, питаемый от внешнего источника электро-

энергии, преобразует этот сигнал в управляющий ток, в обмотке электромагнита который вызывает силу магнитного притяжения таким образом, что нарушенное положение равновесия восстанавливается.

Устойчивость подвеса, также как и необходимые жесткость и демпфирование, достигаются соответствующим выбором закона управления.

Полный неконтактный подвес ротора может быть осуществлен с помощью либо двух радиальных и одного осевого АМП, либо двух конических АМП. Поэтому система активного магнитного подвеса ротора включает в себя как сами подшипники, встроенные в корпус машины, так и электронный блок управления, соединенный проводами с обмотками электромагнитов и датчиками. В системе управления может использоваться как аналоговая, так и цифровая обработка сигналов.

**Достоинствами** АМП являются:

- + относительно высокая грузоподъемность;
- + высокая механическая прочность;
- + возможность осуществления устойчивой неконтактной подвески тела;
- + возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах;
- + возможность использования при высоких скоростях вращения, в вакууме, высоких и низких температурах, стерильных технологиях

**Недостатками** АМП являются:

- сложная и дорогостоящая аппаратура управления
- внешний источник электроэнергии, что снижает эффективность и надежность всей системы.



## Тема 2. Упругие элементы (оболочковые)

В процессе эксплуатации прибора есть группа деталей, деформация которых используется в работе прибора. Такие детали называют упругими элементами (пружинами).

Упругие элементы по основным геометрическим признакам можно подразделить:

– на стержневые упругие элементы, изготавливаемые из проволоки или лент (воспринимают сосредоточенные силы и моменты);

– упругие элементы в виде пластин и оболочек, которые выполняют из листового материала или трубок (обычно нагружаются гидростатическим давлением).

Упругие элементы в виде оболочек, реагирующих на изменение давления, называются манометрическими. К ним относятся мембраны, сильфоны и трубчатые пружины.

Мембраны представляют собой гибкие пластины, прогибы которых определяются величинами действующих давлений.

Сильфоны – гофрированные трубки, способные под нагрузкой получать большие осевые или угловые перемещения.

Манометрические трубчатые пружины представляют собой тонкостенные кривые трубки, под действием давления пружины разгибаются.

### 2.1 Рабочие характеристики упругих элементов

Упругой характеристикой называется зависимость между перемещением к определенной точке упругого элемента и величиной нагрузки. Упругая характеристика является одним из основных показателей свойств упругих элементов и может быть представлена в виде уравнения, в табличной или графической форме.

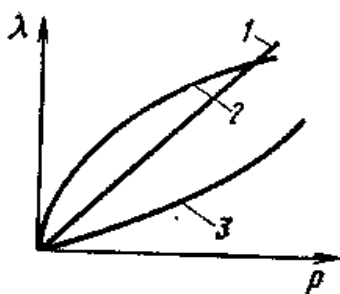


Рис. 2.1 Упругие характеристики

В зависимости от конструкции и способа нагружения упругого элемента его упругая характеристика (рис. 2.1) может быть линейной (1) или неллинейной, затухающей (2) или возрастающей (3).

Важными параметрами, характеризующими свойства упругого элемента, являются его жесткость  $P$  (Н/мм, МПа/мм, Н\*мм/рад и др.). Если характеристика упругого элемента линейна, то жесткость представляет собой отношение нагрузки  $P$  к соответствующему перемещению  $\lambda$ . Чувствительность (податливость) – величина, обратная жесткости и определяется как отношение перемещения к вызвавшей его нагрузке.

При неллинейной характеристике жесткость и чувствительность упругого элемента изменяются по мере возрастания прогиба.

**Перестановочные (тяговые) усилия.** Деформируясь под действием рабочей нагрузки, упругий элемент встречает сопротивление со стороны механизма прибора. Преодоление упругим элементом этого сопротивления оценивается величиной перестановочного (тягового) усилия.

Перестановочная (тяговая) сила относится к числу важных характеристик упругого элемента. От ее величины зависит порог чувствительности прибора. Величину тяговой силы используют при расчетах манометрических упругих элементов преобразующих давление в перемещение, т.е. там, где необходимо развивать тяговую силу, превышающую силу сопротивления механизма прибора.

## 2.2 Плоские мембраны

Плоские мембраны имеют затухающую упругую характеристику, поэтому их используют там, где требуется небольшой ход, при этом мембрана нагружается только рабочим давлением, не испытывая противодействия со стороны механизма прибора.

Металлические мембраны изготовляют штамповкой из листового материала. Такой способ изготовления позволяет выдерживать узкие допуски на толщину материала и на размеры мембраны.

Характер деформации плоской мембраны зависит от величины прогибов, которые она получает под нагрузкой (рис. 2.2).

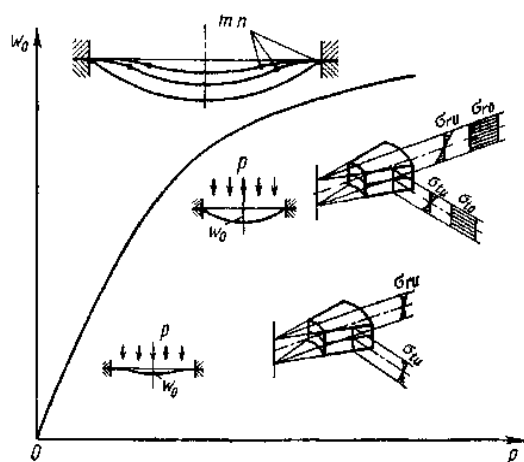


Рис. 2.2 Упругая характеристика плоской мембраны и возникающие в ней напряжения

При малых прогибах перемещения мембраны связаны в основном с изгибом материала. Срединная плоскость мембраны почти не удлиняется. В области малых перемещений мембрана имеет характеристику, близкую к линейной; для ее расчета можно воспользоваться линейной теорией изгиба круглых пластинок.

При увеличении нагрузки прогибы мембраны становятся соизмеримыми с толщиной. Срединная плоскость мембраны удлиняется, что приводит к появлению напряжений растяжения, соизмеримых с изгибными напряжениями. Прогибы мембраны при этом увеличиваются медленнее, чем нагрузка, и упругая характеристика становится затухающей. Расчет мембраны в области больших перемещений должен быть основан на нелинейной теории, учитывающей как изгиб, так и растяжение мембраны в срединной поверхности.

Дальнейшее увеличение прогибов происходит в основном в результате растяжения мембраны. В этом случае расчет можно производить по теории абсолютно гибкой мембраны без учета жесткости на изгиб.

## 2.3 Гофрированные мембраны

В отличие от плоских гофрированные мембраны имеют волнообразный профиль, под которым понимают образующую срединной поверхности.

Их основными достоинствами является:

- работают при значительно больших прогибах;
- в зависимости от формы профиля упругая характеристика может быть линейной, затухающей или возрастающей по давлению.

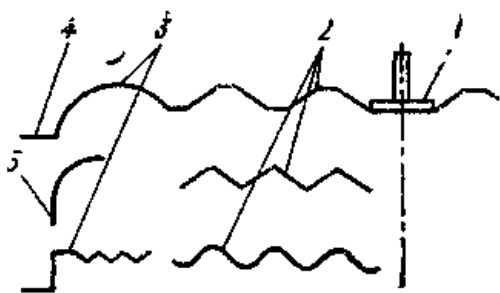


Рис. 2.3 Элементы гофрированной мембраны

На рис. 2.3 показаны часто встречающиеся формы профилей 2 гофрированных мембран: трапецеидальная, пильчатая и синусоидальная. К центральной плоской части мембраны прикрепляют жесткий центр 1, штифт которого служит для передачи перемещения. Плоский 4 или цилиндрический 5 буртик, служат для закрепления мембраны.

У мембраны с мелкой гофрировкой растяжение гофров, следовательно, и нелинейность упругой характеристики проявляются при меньших прогибах, чем у мембраны с глубокой гофрировкой.

Одиночные мембраны, закрепленные по буртику в корпусе (рис. 2.4 а, б), применяют сравнительно редко. Широкое распространение получила конструкция, в которой две одинаковые мембраны соединены по буртику в мембранную коробку. Мембранная коробка обладает следующими достоинствами:

- вдвое больший ход;
- установка в прибор значительно проще (жесткий центр и штуцер предназначенный для крепления в корпусе и подвода измеряемого давления).

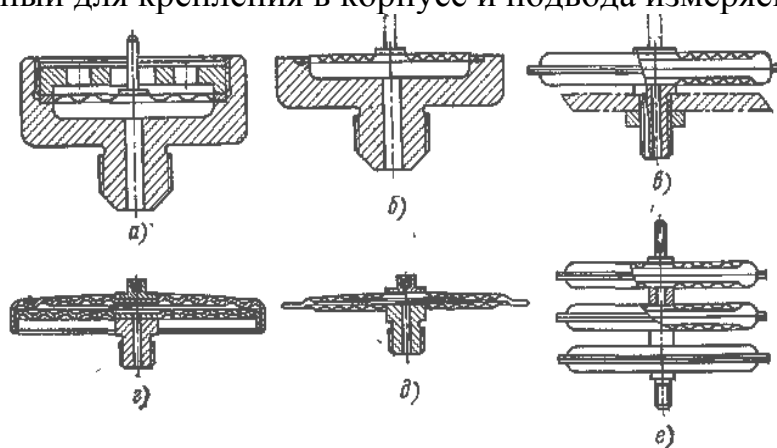


Рис. 2.4 Конструкции мембран

Мембраны соединяют в коробку пайкой или сваркой по буртику (рис. 2.4 в, г, д, е). Так как при этом обе мембраны находятся в одинаковых условиях, пайка (или сварка) не вызывает заметных температурных напряжений, как это имеет место при сварке одиночной мембраны с основанием.

Для увеличения прочности соединения мембран их иногда сваривают друг с другом по грибковой схеме (рис. 15, г). При необходимости иметь минимальный объем внутренней полости, применяют складывающиеся мембранные коробки (рис. 2.4 д). Для увеличения перемещения несколько коробок соединяют в блок (рис. 15, е).

Если мембранный чувствительный элемент при работе может испытывать перегрузку давлением  $P_1$  или  $P_2$  (дифманометр), то для защиты от перегрузок применяют блок двух мембранных коробок, заполненный жидкостью. Недостаток таких систем чувствительность к колебаниям температуры вследствие расширения рабочей жидкости.

Для изготовления мембран используют тонколистовой материал, из которого вырубают кружки — заготовки для мембран. Рифление мембран (нанесение гофрировки) производят механическим способом между жесткими пуансоном и матрицей. Для обеспечения лучших условий вытяжки материала пуансон и матрицу конструируют так, чтобы соприкосновение их с мембраной осуществлялось не по всей поверхности, а только по контактными площадкам.

Высокие упругие свойства имеют мембраны из бериллиевой и никельтитановой бронзы, а также из бронзы с добавлением магния.

Для мембран, соприкасающихся с различными агрессивными средами, широко используют дисперсионно-твердеющие сплавы 36НХТЮ, 36НХТЮ5М, 36НХТЮ8М, которые обладают хорошей коррозионной стойкостью и имеют достаточно высокие упругие свойства. Мембраны из этих сплавов могут работать соответственно при температурах от 250 до 400°C.

## 2.4 Сильфоны

Сильфоны представляют собой осесимметричную трубчатую гофрированную оболочку (рис. 2.5).

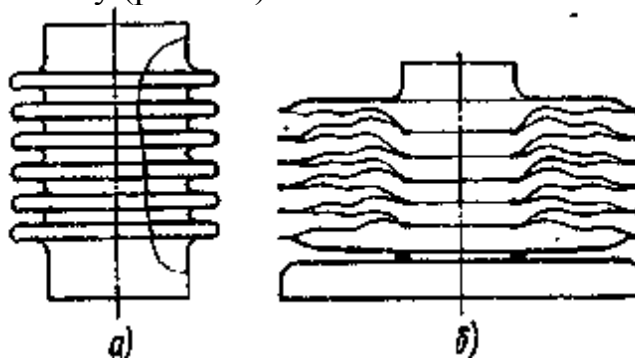


Рис. 2.5 Сильфоны

К **достоинствам** сильфонов относятся:

- + значительные перемещения под действием давления, осевой или поперечной силы и изгибающего момента;
- + при осесимметричном нагружении упругая характеристика сильфона близка к линейной, а эффективная площадь практически постоянна.

Наибольшее распространение получили бесшовные сильфоны, изготовленные из однослойных тонкостенных трубок (рис. 2.5 а). В целях

увеличения прочности и защиты от агрессивных сред применяют многослойные сиффоны, так же изготавливаются сварные сиффоны, изготовленные из штампованных кольцевых мембран (рис. 2.5 б).

Сиффоны могут выполнять разнообразные функции. Их часто применяют в качестве манометрических чувствительных элементов в манометрах, манометрических термометрах, дифференциальных манометрах, и пр. Сиффоны могут развивать значительные усилия, что обеспечивает малый порог чувствительности приборов и позволяет использовать сиффоны в качестве элементов силовых приборов. Их часто применяют в различных приборах в качестве компенсаторов теплового расширения жидкости.

Для изготовления измерительных сиффонов используют в основном дисперсионно-твердеющие сплавы (36НХТЮ, БрБ 2), нержавеющей стали (12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т) и полутомпак (Л80).

Недостаток бесшовных сиффонов – сложность изготовления тонкостенных бесшовных трубок высокой точности.

В последние годы получили широкое применение сварные сиффоны.

При изготовлении сварных сиффонов заготовка не подвергается большим пластическим деформациям, поскольку она состоит из отдельно отштампованных кольцевых мембран. Их изготавливают сваркой по внутреннему и наружному контурам штампованных мембран. Сварные сиффоны разделяют на две основные группы: симметричного профиля (рис. 2.6 а–в) и со складывающимися гофрами (рис. 2.6 г). Последние обычно работают в условиях сжатия. Гофры могут иметь самую разнообразную конфигурацию.

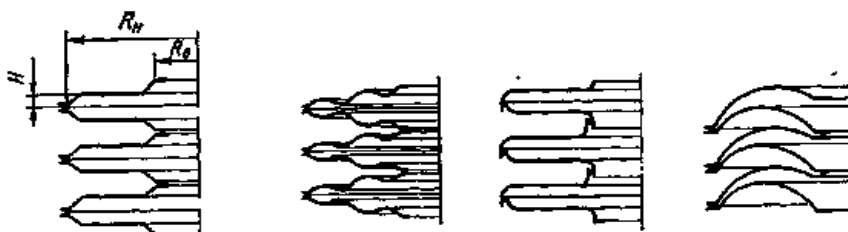


Рис. 2.6 Профили сварных сиффонов

По сравнению с бесшовными сиффонами сварные сиффоны обладают рядом преимуществ:

- обладают большей чувствительностью,
- упругие свойства и эффективная площадь имеют меньший разброс;
- отличаются меньшей разнотолщиностью
- большей однородностью свойств материала в разных точках стенки.

Благодаря возможности более широкого выбора материала для изготовления сварных сиффонов они находят применение там, где использование бесшовных сиффонов невозможно. Применение сварных сиффонов позволило решить проблемы, связанные с повышением их термической и коррозионной стойкости, а также защиты от высоких перегрузок. Гистерезис сварных сиффонов может быть ниже, чем у бесшовных, а долговечность — выше.

## 2.5 Манометрические трубчатые пружины

В манометрических приборах используют свойство кривой трубки деформироваться под действием давления. Одновитковая манометрическая пружина (пружин Бурдона) представляет собой дугу окружности с центральным углом  $200\text{—}270^\circ$  (рис. 27, а) и является наиболее распространенным типом трубчатых пружин.

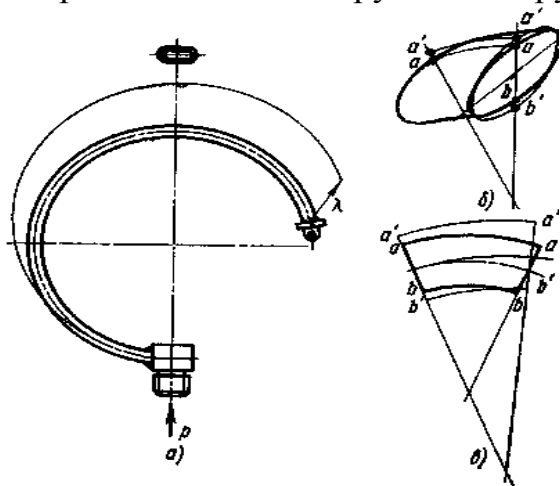


Рис. 2.7 Пружина Бурдона и ее деформации

При подаче во внутреннюю полость давления поперечное сечение трубки деформируется и принимает форму, показанную штриховой линией (рис. 2.7 б). При этом продольное волокно  $a-a$  трубки переходит на дугу  $a'-a'$  большего радиуса, волокно  $b-b$  – на дугу  $b'-b'$  меньшего радиуса. Поскольку волокна стремятся сохранить свою первоначальную длину, поперечные сечения трубки поворачиваются против часовой стрелки (рис. 2.7в), пружина разгибается, и ее конец получает некоторое перемещение  $\lambda$ . Последнее через передаточный механизм передается на стрелку прибора.

Трубчатые пружины обладают малой тяговой силой. В большинстве случаев это является недостатком трубчатых пружин, но при измерении высоких давлений по схеме силовой компенсации, целесообразнее использовать трубчатую пружину вместо сильфона или мембраны.

В приборах, где требуются большие угловые или линейные перемещения упругих элементов, используют винтовые, спиральные многовитковые или s-образные трубчатые пружины (рис. 28, б, в).

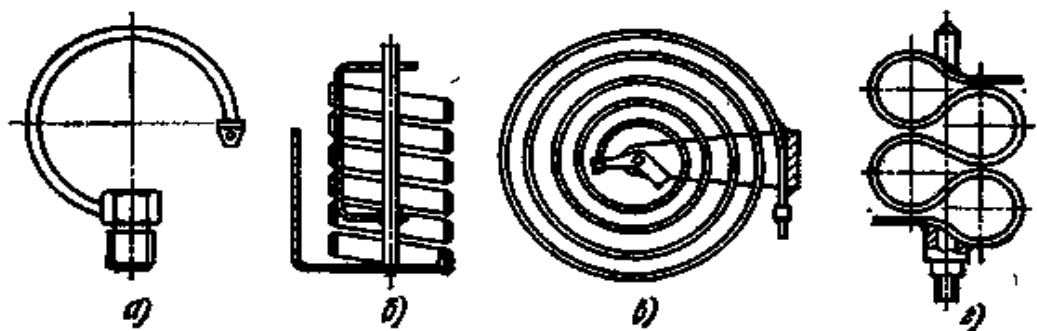


Рис. 2.8 Разновидности манометрических трубчатых пружин

На рис. 2.9 изображены наиболее часто встречающиеся формы поперечных сечений одно- и многовитковых трубчатых пружин.

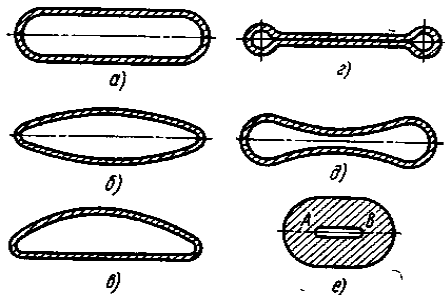


Рис. 2.9 Поперечные сечения трубчатых пружин

Обычно поперечное сечение бывает:

- плоскоовальным (рис. 2.9, а),
- эллиптическим (рис. 2.9 б),
- D-образным (рис. 2.9 в),
- «гантелеобразной» (рис. 2.9 г),
- «восьмерки» (рис. 2.9 д),

– толстостенные пружины плоскоовального сечения (рис. 2.9, е)

Для изготовления трубчатых пружин на низкое давление и при отсутствии жестких требований по гистерезису применяют латуни Л62, Л68 и оловянно-фосфорную бронзу БрОФ 4–0,25, а для пружин высокого давления — различные стали.

Высокой прочностью, малым гистерезисом, стабильными во времени свойствами обладают пружины, изготовленные из дисперсионно-твердеющих сплавов: бериллиевых бронз БрБ 2, БрБНТ 1,9 и др. Для работы в условиях высоких температур (до 200—300° С) и в агрессивных средах применяют пружины из высококачественных сплавов 36НХТЮ, 42НХТЮ.

Иногда трубку-заготовку получают сваркой из листового материала. Разброс характеристик пружин одной партии при этом снижается, поскольку листовая материал имеет меньшие допуски на толщину по сравнению с допусками на цельнотянутые трубки. Сварные трубчатые пружины, обладают высокой чувствительностью, чем бесшовные (рис. 2.10).

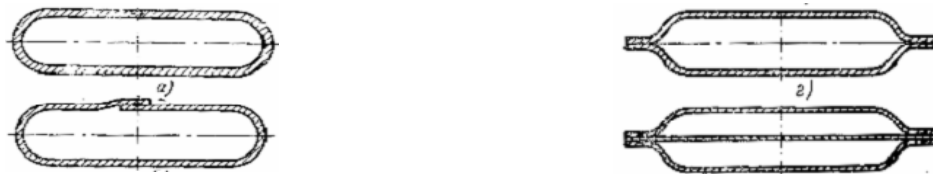


Рис. 2.10 Сечения сварных трубчатых пружин

Применение сварки позволяет создать сложные конструкции манометрических трубчатых пружин. При сварке трех и более полос получают двухполостные или многополостные трубчатые пружины. Перемещение конца такой пружины зависит от соотношения давлений, подаваемых в каждую полость.

### Тема 3. Ограничители движения

Под ограничителями движения понимают механизм или сочетание деталей, которое обеспечивает торможение, остановку и ограничение перемещения или вращения деталей в определенных пределах или неизменную установку деталей в процессе их настройки. Различают следующие ограничители движения:

**Зажимы** обеспечивают неподвижное взаимное положение отдельных деталей механизма за счет сил трения. Причем в отжатом состоянии детали могут поворачиваться относительно друг друга или двигаться поступательно. Трение, удерживающее необходимое положение зажимного устройства, возникает под действием сил, создаваемых установочными винтами (рис. 3.1 а, д), эксцентриком (рис. 3.1 б) или хомутиком (рис. 3.1 г). Широкое распространение получили также цанговые зажимы.

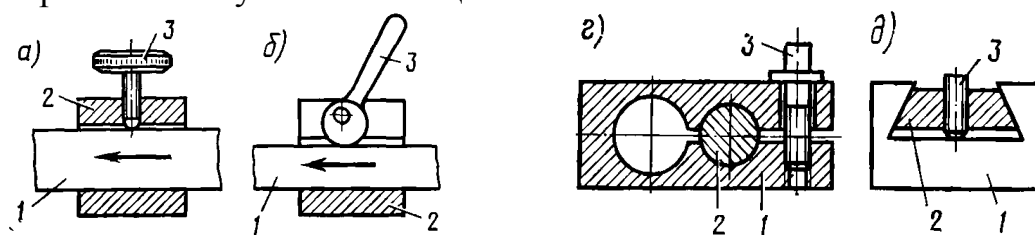


Рис. 3.1 Зажимные устройства

**Фиксаторы** в отличие от зажимных устройств позволяют устанавливать детали механизмов в строго определенные, заранее фиксированные положения.

В простейшем случае задерживающий элемент представляет собой стержень, входящий в паз или отверстие движущейся детали (делительный диск, лимб, звездочка, зубчатое колесо и рейка и д.р.).

Фиксаторы различают двух видов:

- жесткие с принудительным освобождением задерживающего элемента;
- с упругой фиксацией, когда освобождение движущейся детали происходит автоматически.

Первые, как правило, сложнее по конструкции, но зато точнее и надежнее.

Жесткие фиксаторы применяют для фиксации вращающихся или линейно перемещающихся элементов. Фиксаторы с цилиндрическим пальцем (рис. 3.2 а) обеспечивают меньшую точность, чем с коническим пальцем (рис. 3.2 б), из-за зазоров между втулкой и пальцем, которые увеличиваются по мере износа, деталей. Применение направляющих втулок позволяет повысить износостойкость фиксирующего узла, однако при этом появляются ошибки вследствие несовпадения осей втулок гнезд и пальца.

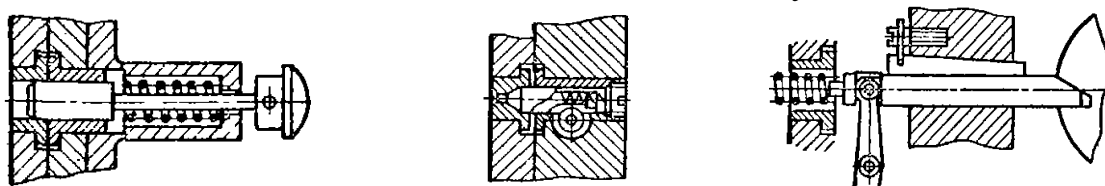


Рис. 3.2 Жесткие фиксаторы с принудительным освобождением задерживающего элемента



В фиксаторах с упругой фиксацией (рис. 3.3) освобождение подвижной детали осуществляется под действием сдвигающей силы  $Q$ .

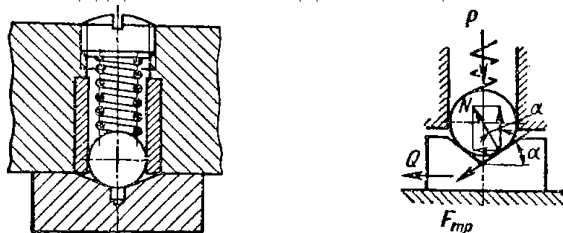


Рис. 3.3 Фиксаторы с упругой фиксацией.

Перемещение шарика происходит по скосу впадины подвижной детали, и необходимая для этого сила определяется по формуле  $Q = P \cdot \operatorname{tg} \alpha$ .

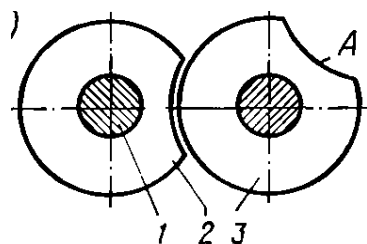


Рис. 3.4 Блокировочные устройства

**Блокировочные устройства** (секреты) предназначены для фиксации взаимного положения деталей приборов. Поворот оси 1 (рис. 3.4 а) невозможен до тех пор, пока шайба 3 не повернется и не займет положение, при котором прорезь А позволит шайбе 2 повернуться вместе с осью.

**Ограничители вращения** применяются для ограничения наибольшего угла поворота  $\gamma_{\max}$  ведомого звена механизма ( $\gamma_{\max} = n \cdot 360^\circ$ ).

**Зубчатый ограничитель с кулачками.** Вращение зубчатых колес  $z_1$  и  $z_2$  (рис. 3.5), находящихся в зацеплении, ограничено кулачками. Стопорные кулачки жестко закреплены винтами на зубчатых колесах и перемещаются в одной плоскости. Вращение зубчатых колес  $z_1$  и  $z_2$  возможно до тех пор, пока кулачки не упрутся один в другой.

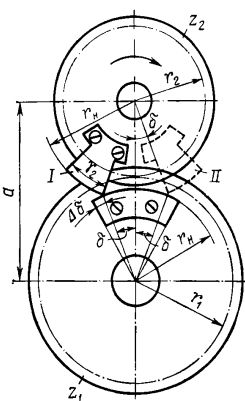


Рис. 3.5 Зубчатый ограничитель с кулачками

Положения кулачка колеса  $z_2$  показаны в начале движения (положение I) сплошными линиями, а в конце движения (положение II) — штриховыми линиями. Количество оборотов колес между крайними положениями

стопорения при зубчатых ограничителях с кулачками может достигать 200.

**Винтовой ограничитель** (рис. 3.6) состоит из винта 4, вращающегося

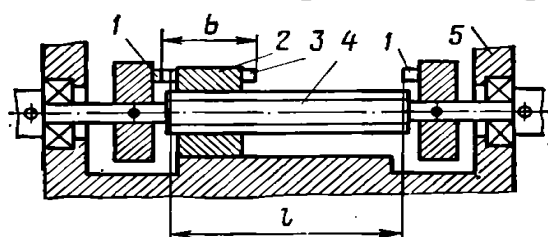


Рис. 3.6 Винтовой ограничитель

в подшипниках, гайки 2, перемещающейся поступательно вдоль направляющей 5, и упоров 1, которые вращаются вместе с винтом. Вращение винта оказывается возможным до тех пор, пока один из упоров 3 гайки 2 не коснется упоров 1.

## Тема 4. Регуляторы скорости

Регуляторы скорости – механизмы управляющие частотой вращения посредством изменения потока энергии, подводимой к механизму. В приборах чаще всего используют регуляторы, воздействующие на расход энергии путем изменения сил сопротивления.

В зависимости от продолжительности непрерывного действия различают:

- тормозные регуляторы, действующие непрерывно;
- спусковые регуляторы, осуществляющие прерывистое действие.

В зависимости от способа рассеяния энергии тормозные регуляторы различают:

- с трением между твердыми телами;
- с трением о среду (жидкость, воздух);
- торможением вихревыми токами (магнитоиндукционные).

Тормозные регуляторы с трением вращающегося элемента регулятора о твердое тело получили наибольшее распространение, так как позволяют получить большой тормозной момент при малых габаритах регулятора и сравнительно небольшой частоте вращения его оси.

**Центробежные тормозные регуляторы** – с трением между твердыми телами имеют две конструктивные разновидности: регуляторы радиального действия и регуляторы осевого действия.

В первых, взаимное давление тел, трущихся друг о друга под действием центробежной силы, направлено по радиусу перпендикулярно оси вращения (рис. 4.1).

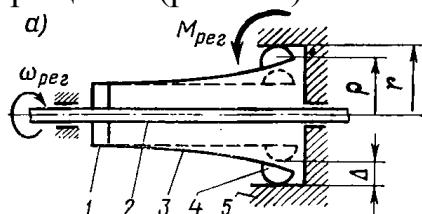


Рис. 4.1 Центробежный тормозной регулятор радиального действия

К буртику 1, на оси 2 регулятора прикреплены пружины 3 с тормозными грузиками 4. При вращении оси пружины изгибаются, грузики расходятся и при критической угловой скорости прикасаются к поверхности неподвижного цилиндрического барабана 5. При дальнейшем увеличении угловой скорости грузики центробежной силой  $F = F_{кр}$  прижимаются к барабану, трутся о его

поверхность и на оси регулятора возникает момент  $M_{рег}$ , пропорциональный квадрату угловой скорости  $\omega_{рег}$  оси:

$$M_{рег} = \mu(m\omega^2\rho - F_{кр})rz$$

$$F_{кр} = k\Delta$$

где  $F_{кр}$  – центробежная сила грузика;

$k$  – жесткость пружины;

$\Delta$  – зазор между грузиком и барабаном при неподвижной оси регулятора;

$f$  – коэффициент трения между грузиками и поверхностью барабана;

$m$  – масса грузика;

$\rho$  – расстояние от оси до центра тяжести грузика, когда он касается барабана;

$r$  – радиус барабана;  
 $z$  – число грузиков.

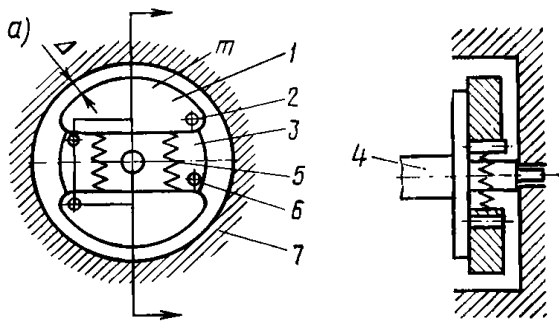


Рис. 4.2 Колодочные тормозные регуляторы радиально действия

Колодочные тормозные регуляторы радиального действия (рис. 4.2), включают в себя тормозные колодки 1, которые могут поворачиваться на осях 2 диска 3, закрепленного на оси 4 регулятора. Пружины 5 стягивают колодки и прижимают их к упорам 6. При вращении оси регулятора с угловой скоростью, близкой к критической, центробежная сила  $F$  преодолевает

начальную силу натяжения  $F_{n0}$  пружин и колодки начинают расходиться и при критической угловой скорости они касаются поверхности барабана. При угловой скорости больше критической на оси регулятора появляется тормозной момент.

Колодочные тормозные регуляторы радиального действия имеют большие радиальные и малые осевые размеры. При этом они обеспечивают большие тормозные моменты при меньших частотах вращения оси регулятора

Центробежные тормозные регуляторы осевого действия (рис. 4.3) – у них силы давления направлены вдоль оси вращения регулятора. Они имеют два основных варианта конструктивных схем: с тормозным диском и тормозными рычагами.

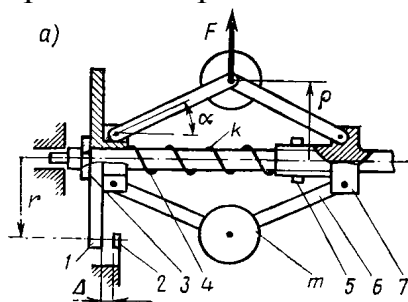


Рис. 4.3 Центробежные тормозные регуляторы осевого действия

К втулке 7, закрепленной на оси регулятора, и к подвижному тормозному диску 1, который может скользить на оси, шарнирно прикреплены тяги 6 с грузиками  $m$ . Пружина 4, натяжение которой может устанавливаться гайкой 5, прижимает диск 1 к упору 3 на оси регулятора. При вращении оси центробежная сила  $F$  каждого грузика через тяги передается диску, преодолевая силу  $F_n$  начального натяжения пружины и сжимая ее дополнительно на величину  $\Delta$ . Диск при

критической частоте вращения оси перемещается к тормозному упору 2 на корпусе регулятора. При частоте вращения, большей критической, диск прижимается к тормозному упору и на оси регулятора возникает тормозной момент

$$M_{\text{рез}} = \mu(m \omega^2 \rho z l (2 \operatorname{tg} \alpha) - F_n - k \Delta) r$$

**Регуляторы с воздушным сопротивлением.** Ось такого регулятора имеет пластинки — крылья (рис. 4.4), при вращении оси на ней возникает тормозной момент  $M_{\text{рег}}$ , зависящий от угловой скорости  $\omega_{\text{рег}}$ .

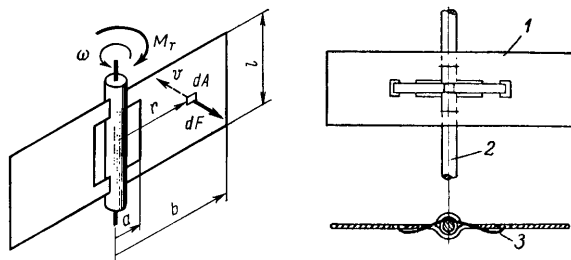


Рис. 4.4 Регулятор с воздушным сопротивлением

В случае прямоугольного крыла тормозной момент определяется:  $M_{pez} \approx 2k\omega^2lb^4$

Коэффициент сопротивления  $k$  при нормальной плотности воздуха весьма мал. ( $k = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ Нс}^2/\text{мм}^4$ ). Тормозной момент таких регуляторов невелик. Вместе с тем к

достоинствам можно отнести простоту устройства, высокую надежность и стабильность в работе. Изменения их характеристики обуславливаются изменением плотности воздуха.

Используя конструкции с переменным размахом крыльев, можно получить увеличение крутизны характеристики в рабочем диапазоне изменения моментов. Иногда на плоскости лопастей выполняют отверстия переменного сечения. Если лопасти вращаются в жидкости, то получаются регуляторы с трением о жидкость.

**Спускные регуляторы угловой скорости** – особенность их работы, в отличие от других регуляторов, состоит в том, что эти регуляторы стабилизируют лишь среднюю угловую скорость.

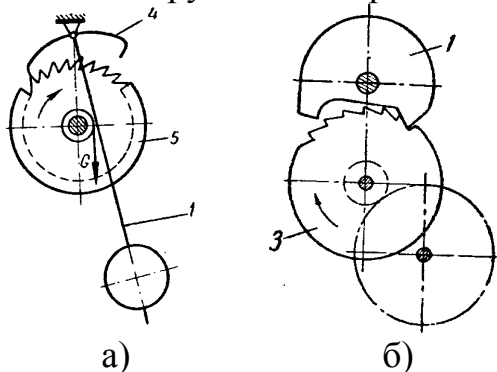


Рис. 4.5 Спускной регулятор

Различают спусковые регуляторы двух типов:

- с собственными колебаниями (рис.4.5а);
- без собственных колебаний (рис.4.5б).

Мгновенная же угловая скорость оси регулятора периодически изменяется в широких пределах – от наибольшего значения до нуля. Поэтому спусковые регуляторы не применяют там, где нужна плавность движения. Спускные

регуляторы с собственными колебаниями обеспечивают высокую точность средней угловой скорости, надежны в работе и имеют стабильные характеристики. Спускные регуляторы без собственных колебаний применяют в механизмах, где не требуется высокая точность в отношении скорости вращения рабочей оси.

**Магнитоиндукционные регуляторы** – состоят из металлического

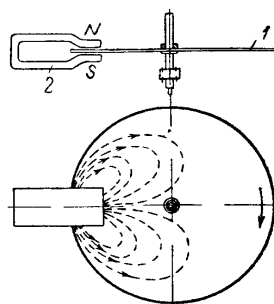


Рис. 9 Магнитоиндукционный регулятор

диска  $1$  вращающегося в поле постоянного магнита  $2$ . при этом в диске наводятся вихревые токи, создающие вторичное магнитное поле. Взаимодействие вторичного и первичного поля через диск приводит к возникновению тормозного момента. Регуляторам этого типа свойственна строгая линейная зависимость тормозного момента от частоты вращения.

Момент регулирования регуляторов этого типа может быть найден:  $M_{pez} = \lambda n \Phi^2 / R$ .

## Тема 5. Успокоители (демпферы)

Успокоители служат для устранения вредных собственных колебаний подвижной системы прибора. Колебания могут быть вызваны ударами, вибрациями, ускорениями. Они могут возникнуть при резком изменении измеряемой величины. Эти колебания приводят к искажению показаний приборов, затрудняют эксплуатацию, могут вообще вывести прибор из строя.

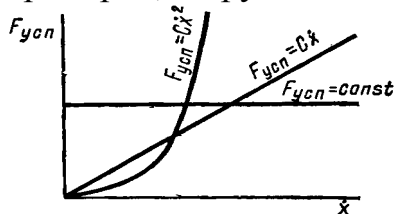


Рис. 5.1 Характеристики демпферов  
 $x$  – ускорение.

В приборах применяют следующие виды успокоителей:

$$F_{ycn} = const;$$

$$F_{ycn} = cx, \text{ – линейный успокоитель;}$$

$$F_{ycn} = cx^2 \text{ – квадратичный успокоитель.}$$

где:  $c$  – коэффициент характеризующий вид системы;

Наиболее распространенными являются успокоители с линейной характеристикой сопротивления. К ним относятся: воздушные, жидкостные и магнитоиндукционные успокоители.

**Воздушные успокоители.** По конструктивному исполнению различают поршневые (рис 3, а, б) и камерные (рис 3, в) демпферы. В качестве «рабочей среды» в воздушных успокоителях выступает воздух, вязкость которого почти не зависит от его температуры.

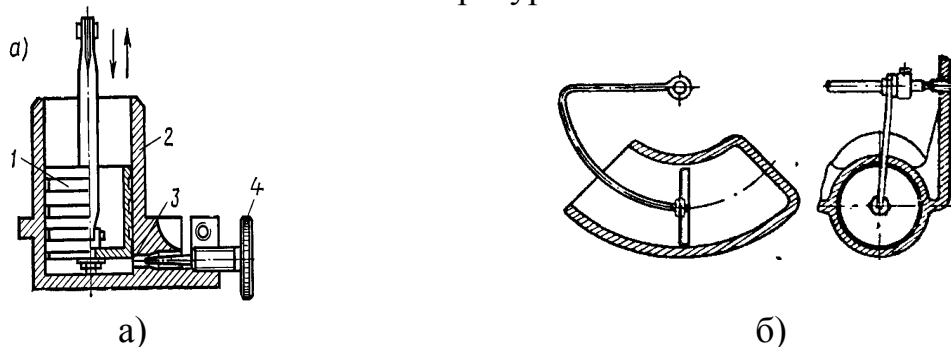


Рис. 5.2 Воздушные демпферы

Сопротивление движению создается при проталкивании поршнем 1 воздуха через отверстие 3 малого диаметра (рис 5.2 а) или через зазор между стенками цилиндра 2 и поршня 1 (рис 5.2 б). Регулировку сопротивления движению можно осуществлять как закручиванием (выкручиванием) винта, так и изменения площади отверстия выполненного в крыле.

К **достоинствам** воздушного успокоителя можно отнести:

- простота конструкции, надежность, удобство в эксплуатации;
- коэффициент успокоения почти не зависит от изменения температуры окружающей среды.

**Недостатки:**

- сжимаемость воздуха ведет к нарушению режима работы успокоителя;
- изменение давления воздуха на разных высотах от уровня моря.

**Жидкостные успокоители** (рис. 5.3). По конструкции они

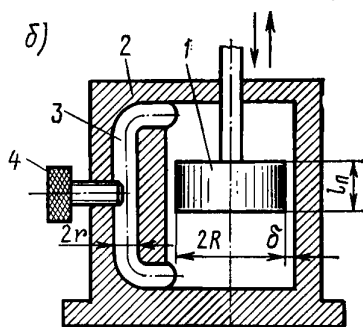


Рис. 5.3 Жидкостной демпфер поршневого типа

напоминают воздушные демпферы поршневого типа. Сопротивление движению подвижной системы создается при проталкивании поршнем 1 жидкости через специальное отверстие 3 малого диаметра, а также через зазор  $\delta$  между поршнем и стенками цилиндра 2. Вместо цилиндра с поршнем может быть использована мембрана или сильфон с малым диаметром входного отверстия

Преимуществом жидкостных успокоителей является возможность получения практически любого коэффициента затухания.

Однако они имеют и **недостатки**:

- сложность конструкции, обеспечение герметичности демпфера;
- зависимость вязкости жидкости от изменения температуры.

**Магнитоиндукционные успокоители** (рис. 7) обеспечивают строгую

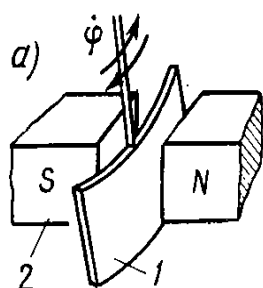


Рис. 5.4 Магнитоиндукционный демпфер

линейную зависимость сил торможения от скорости перемещения подвижной системы прибора. Действие магнитоиндукционных успокоителей основано на возбуждении вихревых токов в металлических деталях, перемещающихся в магнитном поле. Взаимодействие этих полей с основным магнитным полем приводит к возникновению сил, тормозящих движение деталей.

**Достоинства:**

- + надежность работы;
- + коэффициент затухания не зависит от изменений температуры.
- + можно регулировать коэффициент затухания, установив электромагниты и изменить величину тока питания;
- + возможность создания большого успокоения.

**Недостатки:**

- их относительно большие габариты и масса из-за необходимости применения магнитов с большой индукцией в зазоре;
- воздействие магнитных полей на измерительные элементы прибора.

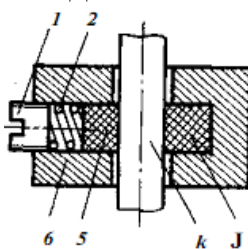


Рис. 5.5 Фрикционный демпфер

**Фрикционные демпферы** (рис. 5.5)

применяют в приборах, работающих в области высоких частот. Принцип их работы основан на использовании моментов сил и сил сухого трения.

Ввиду сложности расчета таких типов устройств подбор коэффициентов ускорения в переходных процессах осуществляется эмпирическим путем в процессе настройки.

## Тема 6. Отсчетные устройства

По способу предъявления информации отсчетные устройства приборов разделяют на: шкальные и цифровые. Шкальные отсчетные устройства обладают следующими **достоинствами**:

- + простота конструкции, компактность, большая надежность и достаточно высокой точности отсчета.

В цифровых отсчетных устройствах результат отсчета измеряемой величины представляется в виде числа. Цифровой отсчет имеет ряд важных **достоинств**:

- + отсутствие субъективных погрешностей,
- + удобство отсчета на большом расстоянии и при большом угле наблюдения,
- + малая утомляемость оператора,
- + возможность автоматической регистрации результатов измерений в измерительных системах и автоматизированных системах управления.

### 6.1 Шкальные отсчетные устройства

Шкала – это совокупность отметок (штрихов), расположенных по прямой, дуге или окружности и соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины. Указатель выполняется в виде стрелки, индекса или светового пятна, которые занимают определенное положение относительно отметки шкалы и показывают деление шкалы, соответствующее значению измеряемой величины.

Форма, размеры, конструкция шкал и указателей определяются назначением прибора или инструмента, точностью измерений и условиями эксплуатации. Согласно ГОСТу шкалы классифицируются по следующим признакам:

- 1) по форме циферблата:
  - плоские;
  - цилиндрические;
  - и конические;
- 2) по конструкции циферблата:
  - *подвижные* – перемещается шкала или ее изображение, указатель остается неподвижным;
  - *неподвижные* – в процессе измерения указатель перемещается относительно неподвижной шкалы;
  - *комбинированные* – шкала и указатель перемещаются относительно друг друга;
- 3) по начертанию:
  - *прямолинейные*, когда отметки шкалы распределены вдоль прямой линии;
  - *дуговые*, когда отметки расположены по дуге окружности до  $180^\circ$

- включительно;
  - *круговые*, когда отметки расположены по дуге окружности свыше  $180^\circ$ ;
  - *винтовые*, когда отметки распределены по винтовой линии;
- 4) по длине делений:
- равномерные шкалы с постоянными интервалом и ценой делений;
  - неравномерные с переменным интервалом и ценой деления. Они имеют криволинейную характеристику и непостоянную чувствительность;
  - комбинированные;
- 5) по освещенности:
- несветящиеся шкалы;
  - подсвеченные от искусственного источника;
  - светящиеся – цифры и отметки покрыты светящейся массой;
- 6) по расположению нулевой отметки:
- односторонние;
  - двусторонние;
  - безнулевые;
- 7) по количеству строк:
- однострочные;
  - многострочные шкалы;
- 8) по способу изготовления циферблата:
- стандартные, изготавливаемые заранее для всех приборов данного типа по предварительной градуировке;
  - индивидуальные, изготавливаемые специально для каждого экземпляра прибора
  - градуируемые после сборки и регулировки.

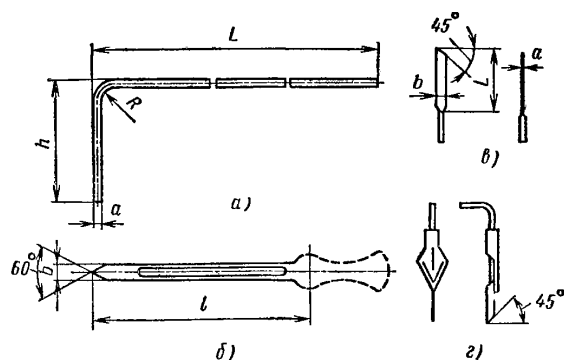


Рис. 6.1 Основные конструктивные формы указателей

В измерительных приборах с непосредственным отсчетом по шкале чаще всего применяются указатели в виде стрелок и индексы в виде штрихов. Наибольшее распространение получили стрелки стержневого, копьевидного и ножевидного типов (рис. 6.1 а-в). Стержневую и копьевидную стрелки используют для грубых отсчетов. С целью повышения точности отсчета применяют ножевидную и нитевую формы концов указателей.



Рис. 6.2 Сечение указателей

Форма сечения указателя (рис. 6.2) должна быть такой, чтобы момент сопротивления площади поперечного сечения был наибольшим при



наименьшей массе и моменте инерции самого указателя относительно оси его вращения. Противоположный конец указателя должен уравнивать его указывающую часть. Уравнивание производят с помощью грузиков. Для быстрого успокоения колебаний к нерабочему концу крепят успокоитель.

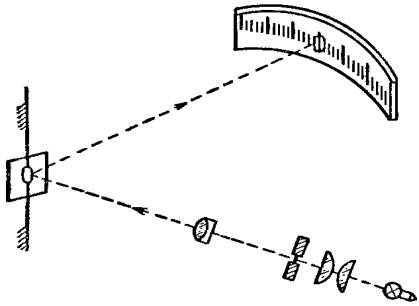


Рис. 6.3 Применение светового луча в шкальных приборах

В приборах с малым вращающим моментом в качестве указателей используют световой луч, перемещающийся по шкале и несущий изображение штриха, перекрестия, стрелки (рис. 6.3). Применение светового луча позволяет повысить чувствительность прибора без увеличения инерционности подвижной части, и устранить ошибку от параллакса.

## 6.2 Цифровые индикаторы. Классификация

Под цифровым (дискретным) индикатором понимают прибор, информационное поле которого состоит из отдельных фиксированных в пространстве элементов отображения (ЭО), а изображение создается одним ЭО или их совокупностью. Каждый ЭО представляет собой неделимую конструкцию, управляемую извне.

В основу классификации дискретных индикаторов положено две группы признаков: назначение, которое в основном задается формой, расположением и числом ЭО, и физические процессы, определяющие действие прибора.

По назначению различают следующие категории индикаторов: мнемосхемы; фиксированные надписи; одноразрядные буквенно-цифровые индикаторы; многоразрядные буквенно-цифровые индикаторы и т.д.

По виду ЭО буквенно-цифровые индикаторы делятся на знаковосинтезирующие и знакомоделирующие. Знаковосинтезирующие индикаторы могут выполняться как матричными ЭО в местах пересечения электродов строк и столбцов, мозаичные (каждый ЭО может включаться или выключаться независимо) и сегментные, ЭО которых представляют собой полоски-сегменты, сгруппированные в знакоместа. В знаковосинтезирующих индикаторах (рис. 6.4, а-в, д, е) изображение создается из элементов, расположенных в плоскости, и угол обзора больше, однако, схемы для формирования из таких ЭО знаков зачастую сложнее, чем в знакомоделирующих индикаторах.

В знакомоделирующих (с целостным представлением информации) индикаторах ЭО выполняются в виде набора готовых знаков. Из рис. 6.4, г видно, что знаки, отображаемые с помощью знакомоделирующих индикаторов, имеют более привычные для глаза начертания, чем в случае знаковосинтезирующих. В то же время ЭО в знакомоделирующих индикаторах обязательно должны быть расположены в различных плоскостях, что

приводит к взаимной их экранировке.

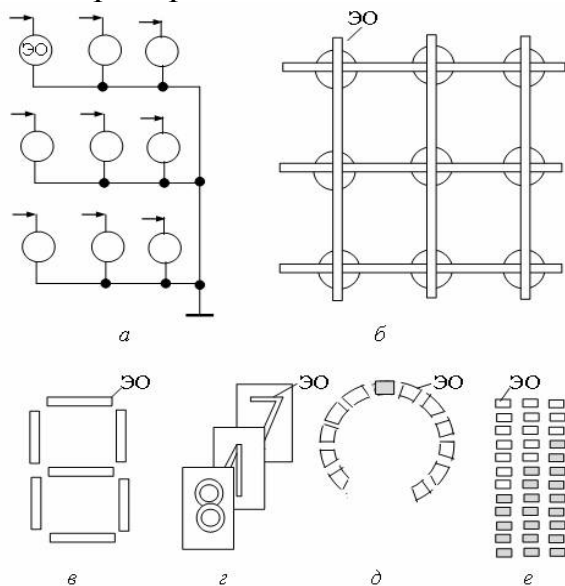


Рис. 6.4 Расположение элементов отображения в дискретных индикаторах:

По принципу действия индикаторы делятся на две основные группы: активные, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется в свет, и пассивные, которые только модулируют внешний световой поток. Основными преимуществами активных индикаторов являются высокое быстродействие, способность работать при малой освещенности окружающей среды и большой угол обзора. По этим параметрам пассивные индикаторы уступают активным, но зато сохраняют контраст при высокой освещенности и потребляют значительно меньше электрической энергии.

В группу активных индикаторов входят полупроводниковые, электролюминесцентные, вакуумные люминесцентные, газоразрядные, накаливаемые вакуумные. К пассивным индикаторам относятся жидкокристаллические, электрофорезные, электрохромные и т.д.

## Тема 7. Конструирование оптических деталей и узлов

Детали, изготовленные из прозрачного для оптического излучения материала и входящие в оптическую схему прибора, называются оптическими. К ним относятся линзы, зеркала, призмы, светофильтры, прозрачные шкалы, сетки и защитные стекла. Исключение составляют зеркала с наружным покрытием и дифракционные решетки, которые могут быть выполнены из непрозрачного материала.

У оптических деталей можно выделить две группы параметров, необходимых для их изготовления.

*Первая группа (расчетные)* — параметры, которые характеризуют оптическое действие линз: к ним относятся световые диаметры, толщина линзы по оси и радиусы кривизны преломляющих поверхностей, а так же константы оптического стекла и технические требования к нему, допуски на качество поверхности, чистоту и центрировку.

*Вторая группа (конструктивные)* — параметры, влияющие на способ крепления. К этой группе относится полный диаметр линзы, выбираемый при окончательном оформлении конструкции линзы в зависимости от способа крепления ее в оправе, а также размеры и расположение фасок.

Фаски, классифицируются на три группы:

- *Технологические* – предназначенные для удаления мелких выколов, образовавшихся при центрировке и для предохранения деталей от выколов;
- *Конструкторские* – предназначенные для крепления оптических элементов завальцовкой или обеспечения центрировки; причем размер фаски берется в отличие от механических деталей по гипотенузе;
- *Конструктивные* – предназначенные для удаления излишков стекла, уменьшения массы, обеспечения условий удобного крепления.

Первые два вида фасок нормализованы и выбираются в зависимости от диаметра оптических элементов; конструктивные фаски не нормализованы и определяются из конструктивных соображений.

Существуют следующие способы крепления линз: крепление завальцовкой (закаткой), крепление резьбовым (зажимным) кольцом, крепление пружинящими планками, проволочным (разрезным) кольцом и крепление приклеиванием. Первые два вида крепления используются наиболее широко, так как они являются универсальными.

**Крепление завальцовкой.** При этом способе линза удерживается в оправе тонкой кромкой, которая приобретает свою конечную форму в результате пластического деформирования металла во время завальцовки (рис.7.1). Такое крепление является неразъемным. Крепежная кромка оправы после завальцовки находится в сопряжении с конусной поверхностью специальной фаски линзы, при этом она не должна выступать за пределы фаски.

Крепление завальцовкой позволяет избежать необходимости проведения юстировочных работ, так как перекося и децентрировка линз исключаются

одновременной обработкой наружного диаметра оправы и подрезкой её опорных торцев с использованием автоколлимационного метода.

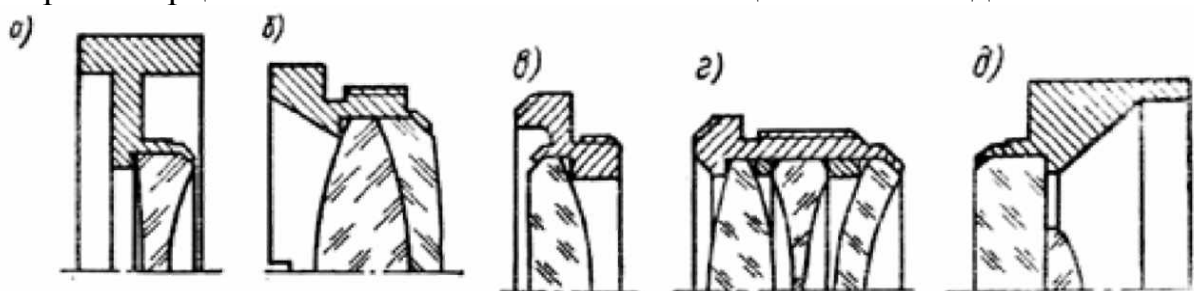


Рис. 7.1 Крепление линз завальцовкой

**Достоинства:**

- + высокая надежность крепления, особенно для линз малого диаметра;
- + отсутствие пережимов в стекле при правильной технологии процесса завальцовки;
- + высокоточное совмещение оптических и механических баз и отсутствие необходимости котировочных работ после крепления оптической детали.

**Недостатки:**

- падение надежности крепления с увеличением габаритных размеров детали;
- высокая точность изготовления опорных поверхностей оправы и линзы.

**Резьбовое соединение.** Крепление линз резьбовым кольцом применяют, когда невозможно применить крепление завальцовкой. При этом способе крепления оптическая деталь прижимается к опорному уступу оправы резьбовым кольцом, кромка которого нажимает на деталь с противоположной стороны. Это крепление является разъемным. На рис. 7.2 показаны примеры конструкций узлов крепления линз резьбовым кольцом.

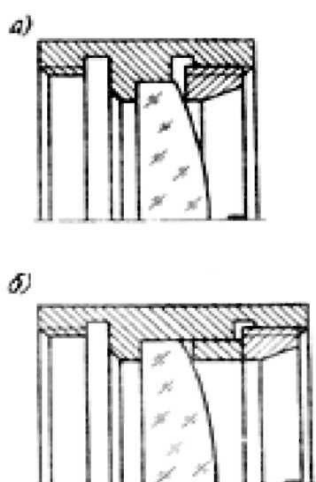


Рис. 7.2 Крепление оптической детали резьбовым кольцом

В отличие от крепления завальцовкой этот вид крепления является жестким. Поэтому, при работе в сложном температурном режиме, возможно существенное ухудшение качества крепления. Помимо того, при креплении резьбовым кольцом трудно обеспечить равномерный прижим оптической детали по всей окружности опорного уступа из-за погрешностей изготовления резьбы, погрешностей расположения торца резьбового кольца (неперпендикулярность), а также погрешностей формы уступа и торца.

Для предотвращения от самоотвинчивания резьбовых колец их необходимо контрить. Для этого применяют установочные винты, завертываемые в резьбовое отверстие оправы или резьбового кольца с внутренней резьбой. При недостатке места установочный винт, может быть,

завернут в торец оправы и резьбового кольца с внешней резьбой, для чего при сборке под установочный винт засверливают резьбовое отверстие. Резьбовые кольца могут также конtringаться с помощью грунтовок или уплотнителей.

#### **Достоинства резьбового соединения:**

- + возможность сборки разборки конструкции оптического узла;
- + использование в тех случаях, когда по конструктивным соображениям крепление завальцовкой невозможно (крепления линз больших диаметров).

#### **Недостатки:**

- неравномерный прижим линзы торцом резьбового кольца, что в свою очередь это приводит к нарушению центрировки, местным натяжениям в стекле и ухудшению качества изображения;
- отсутствие компенсаций температурных колебаний, приводит также к местным натяжениям в стекле и даже возможно разрушение линзы;
- необходимость стопорение резьбового кольца при работе в условиях вибрации и ударных нагрузок;
- при завертывании резьбового кольца, его вращение передается на линзу, что вызывает ее проворачивание.

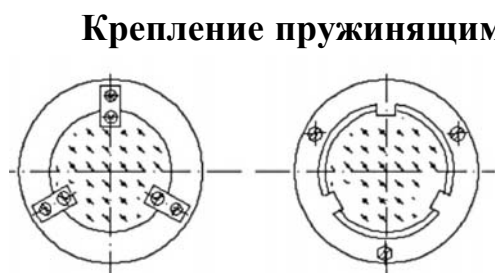


Рис. 7.3 Крепление линз пружинными планками

**Крепление пружинящими планками.** Этот вид крепления основан на принципе «трех точек» (рис. 7.3). В трех зонах, расположенных под углом  $120^\circ$ , на оптическую деталь нажимают три одинаковые плоские пружины на три выступа пружины, обеспечивая силовое замыкание детали на базирующий уступ оправы. Эти плоские пружины называются пружинящими планками.

Прижимные пружинящие планки прикрепляются к оправе винтами, их конструкция и расположение относительно оправы могут быть самыми разнообразными. Конкретное конструктивное решение зависит от особенностей конструкции оправы и всего узла.

**Крепление в эксцентриковых оправках.** Крепление в эксцентриковых оправках применяется для обеспечения возможности юстировки оправы с линзой относительно оптической оси всей системы. В этих оправках линзы укрепляются завальцовкой или резьбовым кольцом.

Величина эксцентриситета ( $n$ ) для всех типов оправ - порядка  $0,5$  мм, что совместно с кольцом позволяет смещать ось до  $1$  мм в любую сторону.

Правила обеспечения зазоров между линзами и оправой остаются те же, как и для предыдущих случаев.

**Крепление методом гальванического наращивания металла в местах соединения.** Такой вид крепления применяется главным образом в микрообъективах, на менисках малого диаметра, где затруднительны или невозможны другие способы крепления.

**Крепление проволочным кольцом.** Этот способ конструктивно прост и технологичен, но используется только для крепления линз в наименее ответственных случаях, когда не предъявляется высоких требований к точности, надежности и герметичности соединения. К таким случаям относятся: рассеиватели, конденсорные линзы.

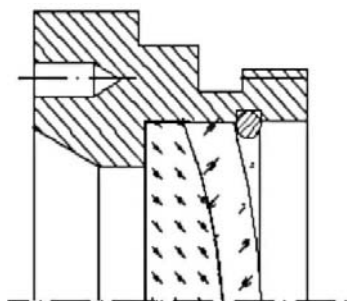


Рис. 7.4 Крепление линз проволочным кольцом

В случае крепления проволочным кольцом оптическая деталь находится между уступом оправы и выступающей частью проволочного кольца, помещенного в специальную канавку (рис. 7.4). Ширина канавки равна диаметру проволоки, глубина-половине диаметра. Кольца изготавливаются из пружинной проволоки. Во избежание выколок, сопряжение оптической детали и кольца должно осуществляться по поверхности её фаски.

**Крепление приклеиванием.** В конструктивном отношении этот способ является самым простым, так как он не требует дополнительных элементов крепления, кроме оправы и склеивающего вещества. На рис. 7.5 показаны варианты крепления линз приклеиванием. Однако такое крепление применяется ограниченно. Оно является неразъемным и жестким. При больших перепадах температуры, из-за разницы коэффициентов термического расширения материалов линзы и оправы, возможно расклеивание или возникновение недопустимых напряжений в стекле и деформаций линзы. Поэтому этот способ крепления применяется, как и крепление проволочным кольцом только в неответственных случаях. Приклеивание эффективно, если проектируемое устройство предназначено для работы в лабораторных условиях, особенно, если реализация других способов затруднительна (детали очень малого диаметра). При этом следует учитывать, что некоторые склеивающие вещества при затвердевании сильно уменьшаются в объеме (усаживаются), что может вызвать появление напряжений в оптической детали сразу же после завершения процесса склейки.

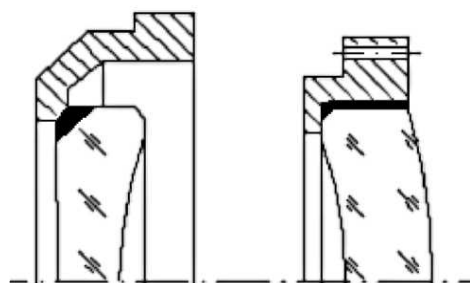


Рис. 7.5 Крепление линз приклеиванием

Для приклеивания линз к металлическим оправам могут применяться: оптические клеи по ГОСТ 14887-80 (акриловый, эпоксидные ОК-50П, ОК-72 и полиэфирный клей ОК-90 пластифицированный), технические клеи по РТМ 3-522-74 (полиуретановый ПУ-2, шеллачный), герметики по ОСТ 3-1927-73 (УТ-32, УТ-34), герметик У30 м (ГОСТ 13489-79).

## Тема 8. Характеристики измерительных преобразователей

Важным показателем эксплуатационных возможностей и области применения преобразователей является зависимость выходного сигнала от входного. В общем случае эта зависимость описывается дифференциальным уравнением, учитывающим как сами величины, так и их временные производные. Эта зависимость существенно упрощается, если входной и выходной сигналы не изменяются во времени или изменяются достаточно медленно. В этом случае говорят о статической характеристике преобразователя (или элемента) или просто характеристике (рис. 8.1).

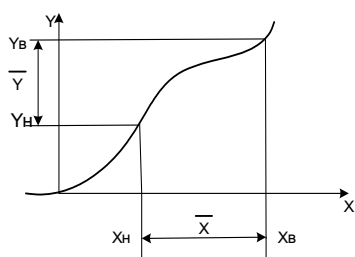


Рис. 8.1 Статическая характеристика

**Статическая характеристика** может быть выражена аналитически уравнением  $y = f(x)$  связывающем выходную величину  $y$  с входной  $x$ , в числовой форме, в виде таблицы или же графически. Графическое представление применяют наиболее часто ввиду его наглядности. Значение входной величины обычно откладывают по оси абсцисс, а значение выходной – по оси ординат.

Рабочий участок характеристики ограничен нижними  $X_n$  и  $Y_n$  и верхними  $X_b$  и  $Y_b$  пределами преобразования.

Разность верхнего и нижнего пределов образует диапазон преобразования по входной  $\bar{X} = X_b - X_n$  и выходной  $\bar{Y} = Y_b - Y_n$  величинам.

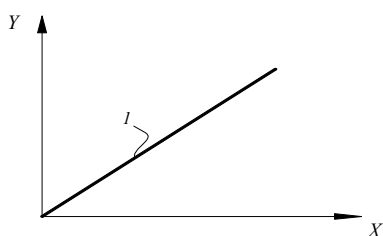


Рис. 8.2 Линейная характеристика

Значения пределов преобразования и форма характеристики определяются как назначением прибора, так конструкцией преобразователя и параметрами его элементов. В большинстве случаев стремятся к тому, чтобы преобразователь имел линейную характеристику, а нижние пределы преобразования были бы равны нулю. Такая характеристика удобно для показывающих

и особенно регистрирующих приборов (рис. 8.2).

Линейная характеристика преобразователей в вычислительных устройствах упрощает осуществление математических операций.

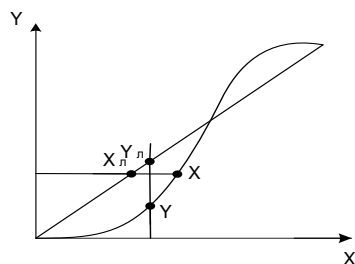


Рис. 8.3 Условно линейная характеристика

Получение строго линейной характеристики сопряжено со значительными усложнениями конструкции преобразователя. Поэтому часто нелинейную характеристику условно считают линейной, если ее нелинейность невелика. Под нелинейностью понимают отношение наибольшей разницы величин  $X$ ,  $Y$  нелинейной и  $X_L$ ,  $Y_L$  линейной характеристик к диапазону (рис.

$$8.3): z = (Y - Y_{Л})_{\max} / \bar{Y} = (X - X_{Л})_{\max} / \bar{X}$$

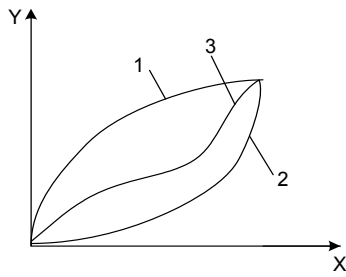


Рис. 8.4 Нелинейные характеристики

Конструктором приборов приходится разрабатывать и использовать преобразователи с различными характеристиками, как с линейными, так и с нелинейными.

Примерами могут служить нелинейные характеристики (рис. 8.4):

- 1 – затухающая
- 2 – возрастающая
- 3 – произвольная

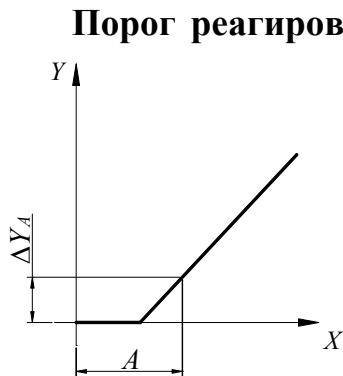


Рис. 8.5 Порог реагирования

**Порог реагирования.** Если входная величина медленно и непрерывно увеличивается от нуля, а выходная величина начинает изменяться только при определенном значении входной величины, то в этом случае имеет место порог реагирования или нечувствительность в нулевой точке (рисунок 8.5). Чтобы исключить неопределенность, связанную с обнаружением факта начала изменения показаний, предусматривается определение малое изменение показаний  $\Delta Y_A$ .

**Вариация показаний.** Вариацией называется разность показаний, получаемая при одном и том же значении измеряемой величины при медленном непрерывном или шаговом подходе к метке шкалы один раз с большего, а другой раз с меньшего значения.

Причины вариации могут быть различными. При наличии люфта в механическом передающем элементе. Для люфта характерна постоянная, не зависящая от измеряемого значения вариации (рис. 8.6 а).

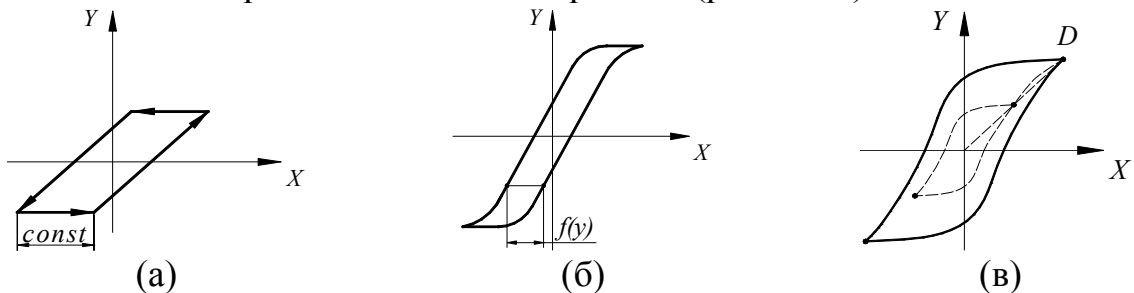


Рис. 8.6

Аналогичная характеристика может иметь место при сухом трении. Правда, в этом случае вариация может зависеть от измеряемого значения (рис. 8.6 б).

Аналогичная характеристика может иметь место и в механических системах. Например, внутреннее трение в материале пружинное приводит к тому, что после снятия нагрузки деформации может не восстановиться в полной мере (рис. 8.6 в). При этом остающаяся разность зависит, прежде



всего, от величины нагрузки (отклонения).

**Разрешающая способность.** Понятие «разрешающая способность» разрешающая способность употребляется в самых разных значениях, применительно к измерительным системам под разрешающей способностью понимают изменение входной величины, необходимое для начала изменения выходной.

Если показания изменяются дискретно, как, например у растровых, резистивных преобразователей, то часто разрешающей способностью называют шаг дискретности. Для цифровых приборов разрешающую способность понимают как значение младшего разряда цифрового отсчета.

**Чувствительность.** Одним из удобных, и поэтому наиболее часто используемых, показателей, характеризующих преобразователь, является его чувствительность. Чувствительностью преобразователя называется отношение приращения выходной величины к приращению входной.

$$S = dy/dx$$

Для линейной характеристики  $S = const$  по всему диапазону измерения.

Для нелинейной характеристики  $S$  – величина переменная и является функцией измеряемой величины.

Для сравнения преобразователей с нелинейной характеристикой иногда пользуются понятием средней чувствительности или чувствительностью по

$$\text{диапазону } \bar{S} = \frac{\bar{Y}}{\bar{X}};$$

В различных областях приборостроения преобразователей называют по размеру. Например, чувствительность различных передаточных механизмов обычно определяется отношением скоростей движения выходного и входного звеньев и называется передаточным отношением, чувствительность упругих элементов приборов иногда называют податливостью и т. д.

Не следует путать чувствительность с порогом чувствительности, под которым понимают наименьшее значение входного сигнала, при котором уверенно обнаруживается изменение выходного сигнала.

Итак, статическая характеристика может быть представлена графически, таблицей, в числовой форме, или аналитически – уравнением и представляет собой функцию преобразования.

**Функция преобразования.** Функция преобразования – функциональная зависимость между выходной величиной  $Y$  и входной  $X$ .

В аналитическую функцию преобразования обычно входят конструктивные параметры прибора или преобразователя и поэтому она исключается при расчете и проектировании.

## Тема 9. Структурные схемы приборов

Измерительные приборы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных неблагоприятных условий ухудшающих их точность. На выходной сигнал  $y$  могут оказывать воздействие: внешние неинформативные параметры и внутренние дестабилизирующие факторы.

Для детального анализа источника погрешностей прибор расчленяют на отдельные, относительно простые элементы – звенья и составляют структурную схему связи элементов между собой. Кроме того, рассматривая каждое звено, как самостоятельный преобразователь, и зная его характеристику, можно легко получить характеристику всего прибора. Приборы, построенные по простым схемам дешевле и надежнее приборов, построенных по сложным схемам. Однако усложнение схемы позволяет получить прибор с лучшими метрологическими характеристиками.

### 9.1 Последовательная схема соединения преобразователей

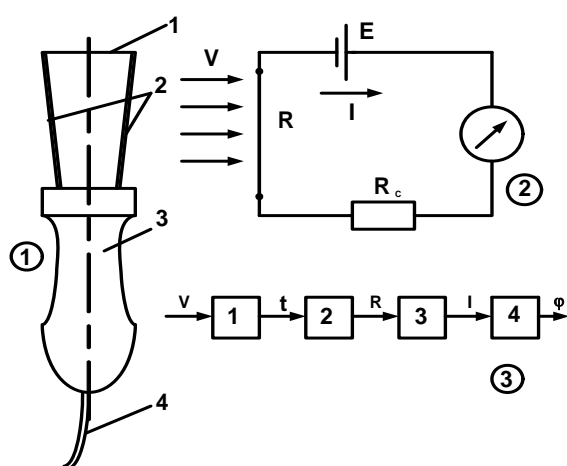


Рис. 9.1 Структурная схема прибора

Последовательной схемой соединения преобразователей называется такая, при которой входной величиной каждого последующего преобразователя служит входная величина предыдущего.

На рис. 9.1 представлена структурная схема термоанемометра.

Датчик представляет собой платиновую проволоку  $l$  с сопротивлением  $R$ , припаянную к манганиновым стержням  $2$ , которые

смонтированы на ручке  $3$ . Датчик подключен в электрическую цепь и нагревается током  $I$ , идущим от источника  $E$ . Символом  $R_c$  обозначено примерное сопротивление проводов, измерительного механизма и источника питания.

Функция преобразования прибора с последовательным соединением преобразователей определяется выражением:

$$\varphi = S_m I = \frac{S_m E}{R + R_c} = \frac{S_m E}{[R_c + R_0(1 + \alpha t)]} = \frac{S_m E}{R_c + R_0[1 + \alpha f(v)]};$$

Чувствительность прибора зависит от чувствительности отдельных его преобразователей  $S_1, S_2, S_3, S_4$  и равна их произведению:

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 = \frac{d\varphi}{dv}$$

Погрешность прибора с последовательным соединением преобразователей зависит от погрешности отдельных преобразователей, т.е. равна сумме пересчитанных к выходу погрешностей всех преобразователей. Преимущество — простота. Недостаток — довольно большая погрешность.

## 9.2 Дифференциальная схема соединения преобразователей

Дифференциальной называется схема, содержащая два канала с последовательным соединением преобразователей, причем выходные величины каждого из каналов подаются на два входа вычитающего преобразователя (рис. 9.2). Вычитающий преобразователь — это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого:  $y = y_1 - y_2$

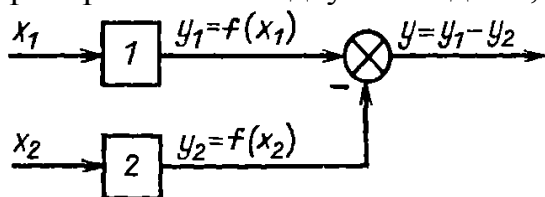


Рис. 9.2 Дифференциальная схема включения преобразователей

Оба канала дифференциальной схемы одинаковы и находятся в одинаковых условиях.

Дифференциальной схемы бывают двух типов. В схеме первого типа измеряемая величина воздействует на вход одного канала, а на вход другого канала подается

величина той же природы, но имеющая постоянное значение. Второй канал служит для компенсации погрешностей, вызываемых условиями работы прибора.

В схеме второго типа измеряемая величина после некоторого преобразования воздействует на оба канала, причем таким образом, что когда на входе одного канала входная величина возрастает, на входе другого — уменьшается.

Для дифференциальной схемы первого типа:  $S_1 = dy/dx = S$ , т.е. она равна чувствительности 1-го канала

Для дифференциальной схемы второго типа:  $S_2 = dy/dx = 2S$ , т.е. удвоенной чувствительности 1-го канала.

Для дифференциальных схем соединения преобразователей аддитивные погрешности каналов 1 и 2 компенсируются. Чувствительность схемы второго типа вдвое выше чувствительности первого типа и равна удвоенному значению чувствительности первого канала.

## 9.3 Логометрическая схема соединения преобразователей

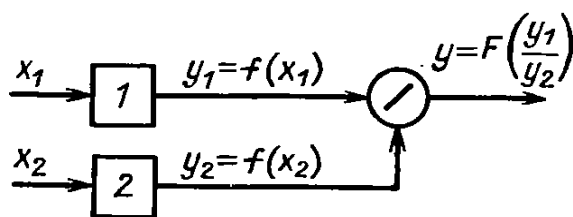


Рис. 9.3 Логометрическая схема включения преобразователей

Содержит два канала с последовательным соединением преобразователей, выходные величины которых подаются на логометрический преобразователь (рис. 9.3). Логометрический преобразователь, это преобразователь

с двумя входами, выходная величина которого является функцией частного от деления входных величин:  $y=F(y_1/y_2)$ .

Оба канала идентичны и находятся в равных условиях. Схема этого вида позволяет компенсировать мультипликативную погрешность. Выходная величина прибора с логометрической схемой определяется:  $y=F(x_1/x_2)y$ .

Логометрическая схема не зависит от изменения чувствительности каналов последовательного преобразования, т.е. компенсирует мультипликативную погрешность.

#### 9.4 Компенсационная схема включения преобразователей

Приборы, построенные по компенсационной схеме (рис. 9.4) имеют:

- малые как аддитивную, так и мультипликативную погрешности.
- большую выходную и малую потребляемую мощность

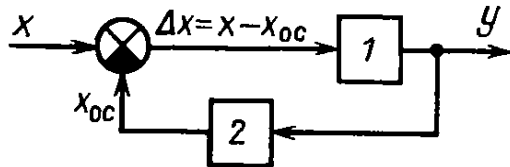


Рис. 9.4 Компенсационная схема включения преобразователей

На один из входов вычитающего преобразователя подается измеряемая величина  $x$ . На другой вход подается сигнал  $x_{oc}$  (ОС – обратной связи), той же физической природы, что и входная величина. Разность  $\Delta x = x - x_{oc}$  поступает на индикатор нуля  $I$ , который служит для определения знака  $\Delta x$ .

Управляющее звено приняв информацию о знаке  $\Delta x$ , увеличивает или уменьшает величину меры, что бы  $\Delta x \rightarrow 0$ . ( $\Delta x = 0$  при  $x = x_{oc}$ ). Звено обратной связи выполняет функции преобразователя масштаба, если  $x$  и  $y$  одной физической природы и преобразователя физической величины, если разной. Величина  $\Delta x$  мала независимо от диапазона измерения  $x$ .

Погрешность компенсационной схемы включения мало зависит от преобразователя 1 и определяется преобразователем 2, т.е. каналом обратного преобразования.

## Тема 10. Измерительные схемы преобразователей

Измерительные схемы служат для передачи обработки и представления сигнала с первичного измерительного преобразователя (ПИП). В большинстве случаев эти схемы являются электрическими или радиотехническими. Они могут использоваться как на постоянном и на переменном токе.

### 10.1 Схемы включения резистивных преобразователей

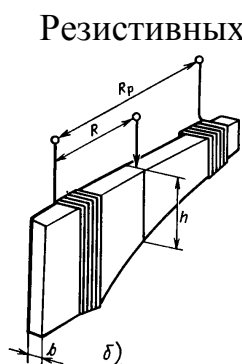


Рис. 10.1 Резистивный преобразователь

Резистивный преобразователь (РП) – это прецизионный реостат, движок которого перемещается под действием измерительной величины. Входной величиной преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, а выходной – изменение его сопротивления. Простейший реостат представляет собой каркас, изготовленный из изоляционного материала, с нанесенным токопроводящим покрытием или намотанной тонкой проволокой, с высоким удельным сопротивлением, по которому (ой) перемещается токосъемный движок.

В измерительной технике используют реостатные преобразователи как с линейной, так и с нелинейной функцией преобразователя (рис. 10.2). Для нелинейной функции преобразователя  $R = f(x)$  каркасы с переменной высотой.

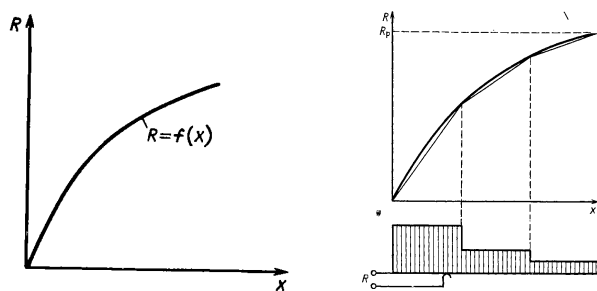


Рис. 10.2 Функция преобразования

Для упрощения изготовления каркаса используют кусочно-линейную аппроксимацию заданной нелинейной функции преобразователя. Для каждого интервала перемещения движка  $x$ , на котором аппроксимирующая функция линейна, высота каркаса постоянна.

Каркас преобразователя получается ступенчатым, Число ступеней равно числу интервалов в кусочно-линейной аппроксимации.

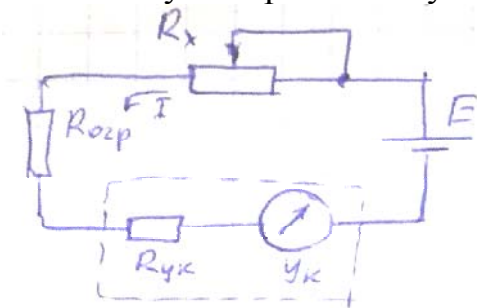


Рис. 10.3 Делитель тока

Простейшая схема с последовательным включением (делитель тока) резистивного первичного преобразователя  $R_x$ , источником питания  $E$  и указателем  $УК$  с внутренним сопротивлением  $R_{ук}$  показана на рис. 10.3.

При изменении сопротивления

$R_x$  изменяется величина тока  $I$  в цепи и, следовательно, угол поворота стрелки указателя.  $R_{огр}$  – служит для ограничения тока в цепи при  $R_x \rightarrow 0$ .

**Достоинство:** – простота реализации схемы.

**Недостатки:**

– зависимость показаний от нестабильности напряжения источника питания  $E$ .

– вследствие изменения тока в цепи изменяется и степень нагрева элементов схемы и сопротивление, что приводит к погрешности.

– невозможность установки на 0.

Возможно включение резистивного преобразователя в **схему параллельно источнику питания** (рис. 10.4). Тогда

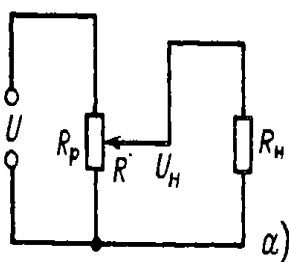


Рис. 10.4 Делитель напряжения

напряжение питания от источника  $U$  подается на кратчайшие выводы резистивного ПИП. Выходное напряжение  $U_{вых}$  подается на нагрузку  $R_n$  с движка потенциометра с сопротивлением  $R$  и с одного из крайних выводов. Если сопротивление  $R_n \gg R$ , то током в  $R_n$  можно пренебречь и преобразователь работает в режиме холостого хода. Если резистивный преобразователь имеет

пропорциональную функцию преобразования, то напряжение  $U_{вых}$  пропорционально перемещению движка  $R$ .

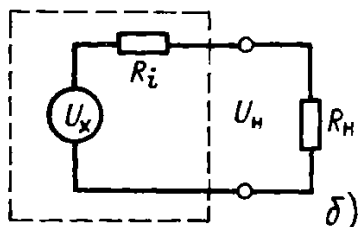


Рис. 10.5 Схема активного двухполюсника

Если  $R_n$  соизмеримо с сопротивлением преобразователя  $R$ , то исследуемую цепь можно представить в качестве активного 2-х полюсника (рис. 10.5), имеющего внутреннее сопротивление  $R_i$  и напряжение  $U_{xx}$ .

Тогда зависимость  $U_{вых}$  от  $\beta$  для различных коэффициентов в нагрузке показано на рис. 10.6.

При малом значении  $\alpha$  напряжение  $U_{вых}$  изменяется пропорционально  $\beta$ . С увеличением коэффициента нагрузки  $\alpha$  появляется нелинейность  $U_{вых}$ , причем чем больше  $\alpha$ , тем больше нелинейность.

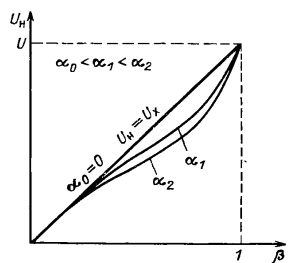


Рис. 10.6 Зависимость  $U_{вых}$  от  $\beta$

**Достоинства** потенциметрических схем:

- + исключается температурная погрешность от разогрева элементов схемы;
- + в режиме холостого хода изменение внешней температуры не меняет распределение напряжений и, соответственно, погрешность отсутствует.

**Недостатки:**

- нелинейность характеристики выходного сигнала при  $R_n$  соизмеримой с  $R$ .
- зависимость показаний от напряжения питания.

- наличие выходного сигнала при отсутствии входного.

**Мостовая схема включения РП.** Устройством, предназначенным для измерения параметров электрических цепей ( $R, C, L$ ) методом сравнения, является измерительный мост.

Сравнение измеряемой величины с образцовой мерой может осуществляться на постоянном и переменном токе. Мост переменного тока может включать в себя не только резисторы  $R$ , но и конденсаторы  $C$  и индуктивности  $L$ , т.е. сопротивление может иметь комплексный характер.

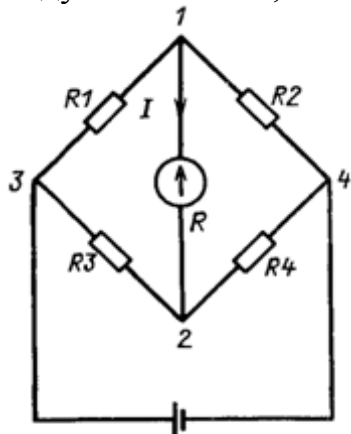


Рис. 10.7 Мостовая схема включения РП.

Мостовая схема включения содержит 4 резистора ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ), называемыми плечами моста, которые соединяются в кольцевой замкнутый контур.

Точки соединения плеч моста (точки 1, 2, 3, 4) называются вершинами. Цепи, соединяющие противоположные вершины моста (вершины 1-2 и 3-4) называются диагоналями. Т.е. в первую диагональ 3-4 подключен источник питания, во вторую 1-2 – измерительный прибор.

В случае, когда  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  ( $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ ) ток в

диагонали измерительного прибора равен нулю и такой мост называется уравновешенным.

В большинстве мост симметричный. Различают 2 вида симметрии:

$$R_x = R_2 \text{ и } R_3 = R_4$$

$$R_x = R_3 \text{ и } R_2 = R_4.$$

Резистивные преобразователи могут включаться как в один, два и четыре плеча. Если сопротивление нагрузки велико (режим холостого хода) то выходное напряжение моста равно:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{пит}} R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{U_{\text{пит}} R_3}{(R_3 + R_4)} = \frac{U_{\text{пит}} [R_1 R_4 - R_2 R_3]}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

где  $U_{\text{пит}} = E$  — напряжение питания.

Чаще всего применяют равноплечие мосты  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ .

Мостовая схема является дифференциальной схемой. Следовательно, в ней компенсируется аддитивная погрешность. С применением этой цепи возможно построение прибора по дифференциальной схеме 1 и 2-го типов.

Чувствительность дифференциальной схемы 2-го типа в 2 раза выше чувствительности дифференциальной схемы 1 типа.

Когда сопротивление нагрузки  $R_n$  неравно бесконечности – выходное напряжение и чувствительность меньше расчетных значений.

При неравенстве сопротивлений плеч моста применяется дополнительный регулировочный резистор.

**Достоинства:**

- + возможность включения 2-х и более резистивных преобразователей – получить высокую чувствительность;
- + компенсируются аддитивные погрешности.

**Недостатки:**

- нелинейность при сопротивлении нагрузки  $R_n$  соизмеримой с сопротивлениями плеч моста.
- при нестабильности питания моста возможна мультипликативная погрешность.

**Логометрическая схема включения РП.**

*Логометр* - измерительный прибор, вращающий момент которого зависит от отношения 2-х токов протекающим по 2-м катушкам.

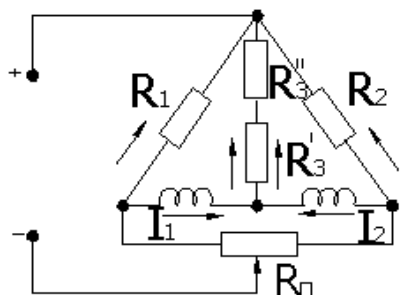


Рис. 10.8 Мостовая логометрическая схема включения РП

Мостовая логометрическая схема включения резистивных первичных преобразователей (рис. 10.8). Схема находится в равновесии при уравнивании плеч моста  $R_1$  и  $R_2$  и среднем положении движка потенциометра  $R_n$ . Резистор  $R_3 = R_3' + R_3''$  и состоит из меди и манганина. Величину сопротивлений  $R_3'$  и  $R_3''$  находят из условия полной термокомпенсации.

Логометрические схемы позволяют компенсировать мультипликативную погрешность, вызванную нестабильностью напряжения питания и частично температурную погрешность.

**10.2 Тензорезистивные преобразователи**



Рис. 10.9 Тензорезистр  $R = \frac{l \cdot \rho}{S}$

Тензорезистивный преобразователь представляет собой проводник, изменяющий своё сопротивление при деформации сжатия-растяжения. При деформации проводника изменяется его длина  $l$ , площадь поперечного сечения  $S$ , деформация кристаллической решетки приводит к изменению удельного сопротивления  $\rho$ :

В качестве тензорезистивных преобразователей используются проводниковые и полупроводниковые материалы.

К первым относятся: фольговые, пленочные и проволочные тензорезисторы. Полупроводниковые тензорезисторы изготавливаются из кремния или германия. Свойства полупроводниковых и металлических преобразователей сильно различаются. Чувствительность полупроводниковых преобразователей может быть как положительной, так и отрицательной.

Тензорезисторы могут использоваться:

- либо для измерения механических напряжений и деформаций, тогда они включаются, как и резистивные преобразователи, в мостовую цепь по



дифференциальной схеме 1-го типа;

– либо для измерения других механических величин: сил, давлений, ускорений и т.д., когда деформация является промежуточной величиной преобразования. В этом случае используется мостовая цепь по дифференциальной схеме 2-го типа.

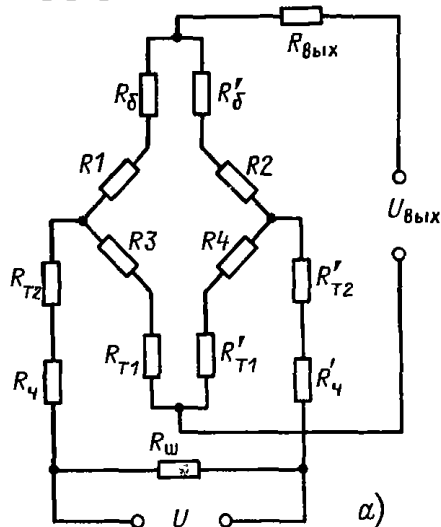


Рис. 10.10 Мостовая схема включения тензорезисторов

$R_{ш}$ ,  $R_{вых}$  – служит для регулировки входных или выходных сопротивлений моста.

Выходное напряжение терморезистивного моста не превышает 10-20 мВ, поэтому для дальнейшего преобразования выходной величины  $U_{вых}$  используются усилители.

**Достоинство:**

- + высокая чувствительность  $S=50-130$ ;
- + в мостовой схеме включения компенсируется аддитивная погрешность.

**Недостатки:**

- зависимость сопротивления и чувствительности от температуры;
- большой разброс параметров с характеристик.

### 10.3 Терморезисторы

Терморезистором называется измерительный преобразователь, активное сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Различают: металлические и полупроводниковые.

Наибольшее распространение получили терморезисторы, сопротивление которых уменьшается при увеличении температуры, т.е. терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Вместе с тем, существуют резисторы, сопротивление которых возрастает с ростом температуры. Их обычно называют позисторами.

Основной характеристикой терморезистора является температурная зависимость сопротивления. Она совпадает с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен терморезистор.

В тензорезисторных приборах высокой точности используют схемы с нормирующими (компенсационными) резисторами (рис. 10.10).

$R_1$ ,  $R_4$  – тензорезисторы воспринимают информацию.

$R_B$  – резисторы для балансировки моста.

$R_T$  – термозависимые резисторы, для компенсации аддитивной температурной погрешности.

$R_4$ ,  $R'_4$  – резисторы, изменяя сопротивление которых можно регулировать чувствительность датчика.

$R_{T2}$ ,  $R'_{T2}$  – термозависимые резисторы, с помощью которых компенсируются температурные изменение чувствительности.

$R_{ш}$ ,  $R_{вых}$  – служит для регулировки входных или выходных сопротивлений моста.

При измерении температуры терморезисторы включаются в мостовые схемы, а так же в компенсационные (при наибольших точностях).

Перемещением движка реохорда  $R_p$  (рис. 10.11) добиваются уравниванием моста (начало изменений).  $R_1, R_3$ - резисторы,  $R_t$ - терморезисторы,  $R_p$ - сопротивление реохорда.

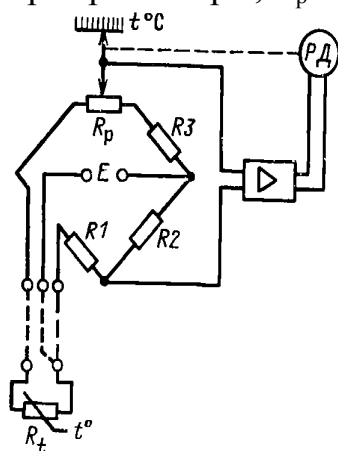


Рис. 10.11 Мостовая схема включения терморезисторов

При повышении температуры мост выходит из равновесия, напряжение измеренной диагонали усиливается и подается на реверсный двигатель РД, последний перемещает движок реохорда, чтобы вернуть мост в уравновешенное состояние. Заодно перемещая указатель и изменение температуры считается по отсчетной шкале.

При подключении металла терморезисторов для компенсации температурной погрешности проводников используют трехпроводный кабель (как показано на схеме).

Для полупроводников терморезисторов погрешность вызванная температурным изменением сопротивления кабеля ничтожна, поскольку сопротивление и чувствительность преобразователя намного больше чем сопротивления линий связей.

**Недостатки** полупроводниковых терморезисторов:

- нелинейность функции преобразования;
- большой разброс их параметров и старение.

#### 10.4 Индуктивные преобразователи

Индуктивные преобразователи представляют собой катушку индуктивности, полное сопротивление которой изменяется при взаимном относительном перемещении магнитопровода, т.е. движение сердечника относительно катушки или наоборот.

Различают 2 группы индуктивных преобразователей: изменяющиеся индуктивностью и изменяющиеся активным сопротивлением.

Индуктивные первичные преобразователи работают только на переменном токе и могут быть включены по всем схемам включения резистивных первичных преобразователей. Комплексное сопротивление  $Z$ :

$$Z = R_{np} + \omega L$$

где  $R_{np}$ - сопротивление обмотки;

$\omega L$ - реактивное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $\omega$ - частота.

**Достоинства:** простота.

**Недостатки:**

– преобразователь является электромагнитом, который воздействует на контролируемый техпроцесс и величина воздействия не линейна, зависит от перемещения якоря или сердечника;

– аддитивная погрешность вследствие изменения активного сопротивления под действием температуры. Она может быть весьма

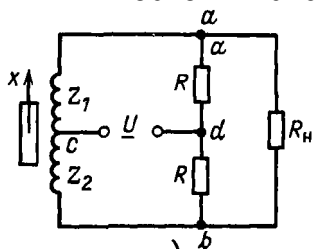
значительной;

– сила притяжения якоря или сердечника может быть соизмерима с усилительными усилиями.

Этих недостатков лишены индуктивные преобразователи включенные в дифференциальные цепи второго типа.

Дифференциальный индуктивный преобразователь состоит из двух одинарных индуктивных преобразователей имеющие одинаковые характеристики и имеющие общий подвижный элемент (сердечник).

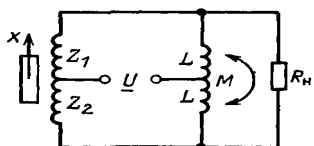
Мостовых схемы включения индуктивных преобразователей (рис. 10.12)



$$Z_1 = R_{np} + \omega L_1$$

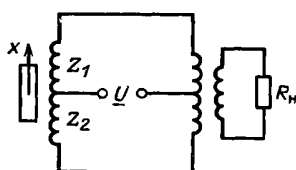
$$Z_2 = R_{np} + \omega L_2$$

При перемещении якоря одна индуктивность увеличивается, а другая уменьшается. Сопротивления других плеч могут быть активными ( $R_1, R_2$ ), так и реактивными (когда включены катушки,  $L$  рис. 2 и 3)



Секция двухобмоточного дросселя.

Магнитная система преобразователя и катушки  $L$  выполнены из одного материала для компенсации изменения магнитного поля при изменении напряжения питания.



Трансформаторная схема с 2-х секционной обмоткой.

Он позволяет согласовать сопротивление преобразователя сопротивлением нагрузки и получить гальваническую развязку цепи питания преобразователя от цепи нагрузки.

Рис. 10.12 Мостовые схемы включения индуктивных преобразователей

В идеальной схеме при среднем положении сердечника (якоря)  $U_{вых} = 0$ . Однако из-за разброса параметров плеч моста это равенство не выполняется. Поэтому необходима балансировка. Балансировка моста переменного тока осуществляется с отдельной регулировкой действительной и мнимой составляющей его входного напряжения. Мнимую часть регулируют перемещением якоря, действительную - при помощи  $R_1$  и  $R_2$ .

**Достоинства:**

- + выходная характеристика преобразователя близка к линейной.
- + чувствительность в 2 раза выше, чем у одинарных индуктивных преобразователей.
- + уменьшена сила притяжения якоря.

**Недостатки:** Возможны аддитивные и мультипликативные погрешности вследствие действия температуры.

## 10.5 Трансформаторные первичные преобразователи

Трансформаторный преобразователь представляет собой такой

преобразователь, у которого под влиянием входного сигнала изменяется взаимоиндуктивность, что приводит к изменению вторичного выходного напряжения.

Различают трансформаторные преобразователи по 2-м видам:

- с изменяющимся магнитным сопротивлением;
- с постоянным магнито-сопротивлением и подвижной обмоткой.

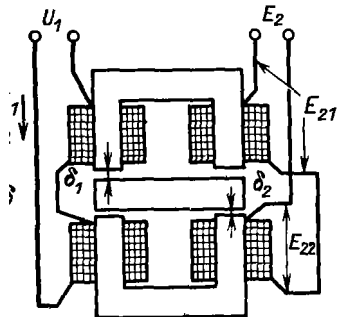


Рис. 10.13 Трансформаторный преобразователь с изменяющимся магнитным сопротивлением

Трансформатор первого вида по конструкции напоминают индуктивные преобразователи и отличаются наличием второй обмотки. Его включают дифференциальную схему второго типа, которая обладает большей стабильностью первичного тока

При перемещении якоря первичная обмотка  $Z_1$  возрастает, а сопротивления  $Z_2$  уменьшается примерно на такую же величину. И тем самым  $I_1$  остается постоянным и равным. Вторичная ЭДС  $E_2$

дифференциального преобразователя равна разности ЭДС одинарных, т.е.  $E_2 = E_{21} - E_{22}$ .

Функция преобразования ТПИП линейная

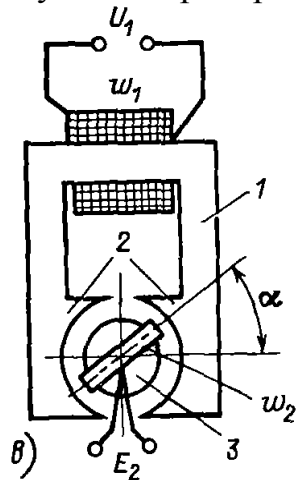


Рис. 10.14 Трансформаторный преобразователь с постоянным магнито-сопротивлением и подвижной обмоткой

К преобразователям второго вида относятся ферродинамические трансформаторные преобразователи и вращающиеся трансформаторы (рис.10.14).

- 1-магнитопровод,
- 2- полюсные наконечники,
- 3- цилиндрический ферромагнитный сердечник.

Воздушный зазор между полюсными наконечникам и сердечником одинаковы, что позволяет образовать одинаковую магнитную индукцию. Обмотка  $W_1$  включается в цепь переменного напряжения  $U_1$ , тем самым создавая магнитный поток  $\Phi_2$ . Часть его проходит через вторичную обмотку  $W_2$  и наводит в ней вторичное ЭДС

$E_2$ . При повороте обмотки  $W_2$  ЭДС  $E_2$  изменяется.

$$E_2 = j\omega_2 \Phi_2 = \left( \frac{2b}{p} \right) \left( \frac{W_2}{W_1} \right) U_1$$

ЭДС вторичной обмотки  $E_2$  пропорционально углу поворота  $\alpha$ .

**Схема включения трансформаторных преобразователей** (рис. 10.15). Первичное напряжение  $U_1$  подается на первичный преобразователь, это же напряжение подается на обмотку возбуждения  $W_1$  вторичного

преобразователя. Измеряя входное напряжение  $E_2$ , с первичного преобразователя подводится к рамке вторичного преобразователя. Вращающий момент ферродинамического механизма пропорционален току  $I_2$  протекающему в рамке  $W_2$  и направлен так, чтобы его уменьшить. Рамка  $W_2$  поворачивается и устанавливается в таком положении, когда её ЭДС и  $E_{2к}$  уравновесят входную ЭДС первичного преобразователя.

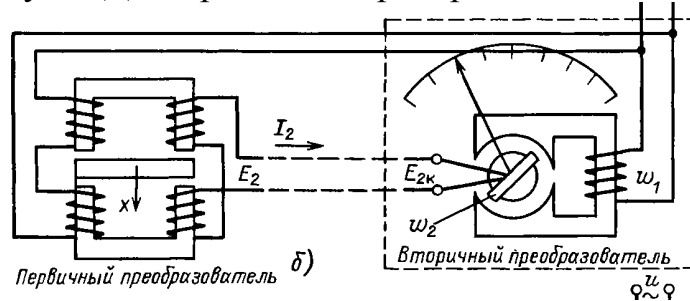


Рис. 10.15 Схема включения трансформаторных преобразователей

### 10.6 Емкостные преобразования

Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется под действием входной величины.

Конденсатор состоит из 2-х пластин электродов между которыми находятся диэлектрик (воздух). Изменяя взаимное положение электродов или свойства диэлектрика (его диэлектрическую проницаемость) можно изменить емкость конденсатора.

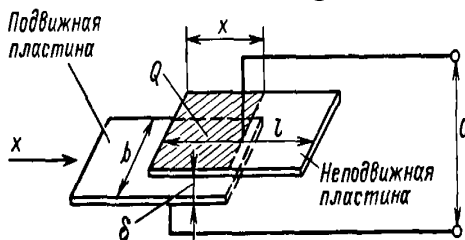


Рис. 10.16 Емкостный преобразователь

Емкость преобразователя определяется:

где  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  
 $\epsilon_r$  - относительная проницаемость

$Q$  - площадь перекрытия,  
 $\delta$  - расстояние между электродами.

Изменение любого из этих параметров может привести к изменению емкости преобразователя

#### Резонансная схема включения емкостных преобразователей.

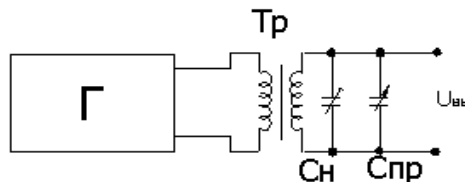


Рис. 10.17 Резонансная схема включения емкостных преобразователей

Генератор через разделительный трансформатор  $T$  питает резонансный  $LC$  - контур.

Индуктивность контура - это вторичная обмотка трансформатора  $T$ , а емкость состоит из емкостей преобразователя  $C_{пр}$  и конденсатора настройки емкости  $C_n$ . Частота генератора и его выходное напряжение постоянны. При изменении  $C_{пр}$  напряжение на

контуре  $U_{\text{вых}}$  меняется по резонансной кривой.

Подстроенный конденсатор  $C_n$  служит для настройки схемы на максимальную чувствительность. Чувствительность схемы высокая. Она увеличивается при увеличении добротности контура.

Данная схема чувствительна к температурным погрешностям и имеет нелинейность статического характера, а также требует стабилизации частоты генератора. Требуется применение измерения прибора с высоким входным сопротивлением  $R_{\text{вх}}$ .

### Мостовая схема включения емкостных преобразователей

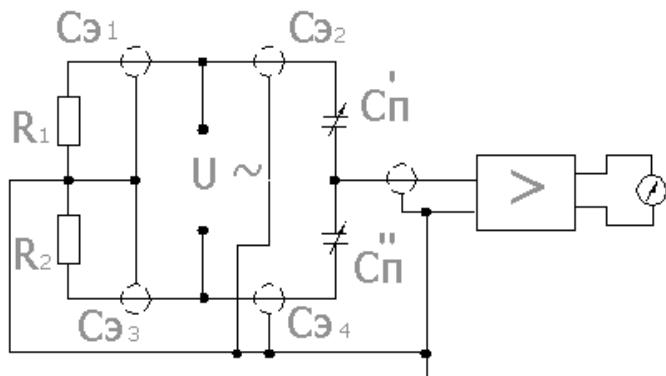


Рис. 10.18 Мостовая схема включения емкостных преобразователей

Схема представляет собой 4-плечий мост, где  $C_{п'}$  и  $C_{п''}$  - дифференциальный преобразователь 2-го типа. При изменении емкостей  $C_p$  нарушается баланс моста и на измерительной диагонали появляется выходной сигнал, который усиливает и поступает на измерительный прибор.

Для устранения влияния внешних электромагнитных полей применимо экранирование соединительных проводов. Емкости  $C_{з1}$ ,  $C_{з2}$ ,  $C_{з3}$ ,  $C_{з4}$  включены параллельно активным сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  и входит в полное сопротивление плеч моста. Эти емкости могут изменяться в процессе работы.

Для уменьшения влияния сопротивления на выходное сопротивление моста сопротивление  $R_1$  и  $R_2$  берутся малого номинала. Т.к.  $C_{з5}$ , не входит в диагональ моста, то оно не влияет сильно на изменение выходного напряжения.

## 10.7 Пьезоэлектрические преобразователи

В кристаллических диэлектриках различно заряжены ионы располагаются в определенном порядке и образуют кристаллическую решетку. Действие пьезоэлектрического преобразователя основана на прямом пьезоэффекте - электризация кристалла под действием внешних сил.

Вещества, которые обладают пьезоэффектом, называются пьезоэлектриками. Для изготовления измерительных преобразователей наибольшее применение нашли кристаллы кварца, а также искусственные пьезоэлектрические материалы – пьезокерамика.

Входной величиной воздействующей на преобразователь являются силы производящие как деформацию сжатия - растяжения, так и деформацию сдвига. Выходная величина - напряжение на электродах.

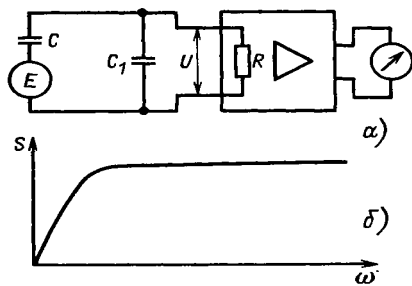


Рис. 10.19 Схема включения пьезоэлектрического преобразователя

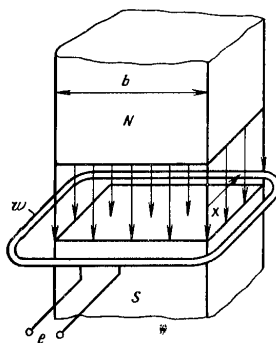
При постоянной силе воздействия измерять ЭДС трудно, т.к. заряд мал и быстро протекает через входное сопротивление вольтметра. При переменной силе процесс измерения ЭДС упрощается.

Для измерения вырабатываемой пьезоэлектрическим преобразователем ЭДС используется вторичный преобразователь, в роли которого выступает вольтметр переменного тока проградуированный в единицах на измеряемую величину. Пьезоэлектрический преобразователь не приемлем для измерения статических напряжений.

Погрешности могут быть вызваны:

- изменением температуры,
- изменения влажности,
- несовершенство пьезоэлектрических материалов,
- наводка внешними электромагнитными полями, паразитной ЭДС, нестабильность параметров экранирования кабеля.

### 10.8 Индукционные преобразователи



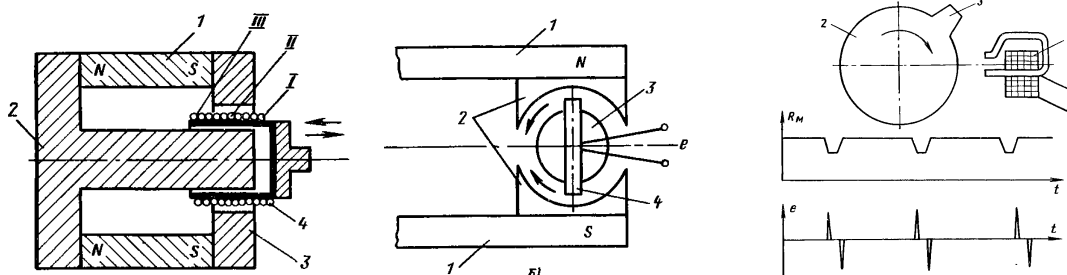
Индукционный преобразователь - преобразователь, принцип действия которого основан на законе электромагнитной индукции. При воздействии входной величины на преобразователь изменяется потокосцепление  $\psi$  катушки с внешним по отношению к катушке магнитным полем. ЭДС наведенное в катушке определяется:

$$e = \frac{-d\psi}{dt}$$

Потокосцепление :  $\psi = \omega \cdot B \cdot Q$

где  $\omega$  - число витков; B - индукция магнитного поля;  
Q - площадь, через которую проходит проводник.

Индукционный преобразователь служит для преобразования линейной или угловой скорости перемещения катушки относительно магнитного поля в ЭДС.



### Погрешность индукционных преобразователей.

ЭДС индукционных преобразователей пропорциональна скорости перемещения катушки лишь при условии, что индукция  $B$  постоянна на протяжении всего пути ее перемещения. Непостоянство индукции вызывает возникновение погрешности.

Погрешность индукционных преобразователей также зависит от тока, который потребляет вторичный преобразователь. Проходя по измерительной обмотке индукционного преобразователя, этот ток создает магнитное поле, которое направлено встречно направлению основного поля. Вследствие этого уменьшается чувствительность тахометрического преобразователя и его функция преобразования становится нелинейной, что приводит к погрешности. Описанный вид погрешности присущ тахометрическим преобразователям, поскольку их вторичными приборами служат электромеханические приборы с большим потреблением мощности. Для уменьшения погрешности следует уменьшить ток преобразователя.

## Тема 11. Компенсаторы и компенсационные схемы включения

Компенсатор (потенциометр) - прибор для измерения методом сравнения ЭДС напряжений или величин, функционально с ними связанных. Существуют компенсаторы постоянного и переменного тока.

### 11.1 Компенсатор постоянного тока

Компенсатор постоянного тока обычно выполняются по следующей схеме (рис. 11.1).

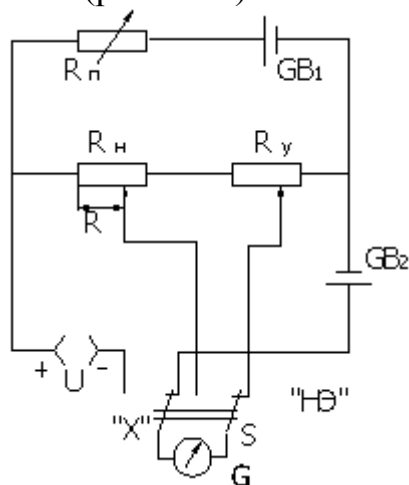


Рис. 11.1 Компенсатор постоянного тока

Источник постоянного тока  $GB_1$  обеспечивает протекание тока  $I$  в цепи составленной из измерительного резистора  $R_{и}$ , установочного  $R_y$ , регулируемого  $R_{п}$ . Образцовым источником нагружения служит элемент  $GB_2$ . При помощи выключателя  $S$  гальванометр  $G$  можно подключать в цепь нормального элемента (положение «НЭ») или в цепь измерительного элемента (положение «X»). В соответствии с идеей метода измеряемое напряжение  $U_x$  необходимо сравнить с падением напряжения создаваемым рабочим током  $I$  на участке  $R$  измерительного резистора  $R_{и}$ . На практике в качестве

сопротивления  $R$  используют магазин сопротивлений обеспечивающий высокую точность значения требуемое  $R$ .

Процесс измерения напряжения состоит из 2-х операций:

- 1 – установление рабочего тока  $I$ ,
- 2 – уравнивание измеряемого напряжения  $U_x$  напряжением



создаваемым рабочим током и сопротивлением  $R$ .

Для установки рабочего тока переключатель гальванометра ставят в положение «НЭ» при помощи резистора  $R_p$  добиваются отсутствия тока в гальванометре. Это будет в том случае, когда падение напряжения на установочном резисторе  $R_y$  равно ЭДС нормального элемента. Затем переключатель  $S$  устанавливают в положение «X» и при помощи  $R_n$  устанавливают такое значение сопротивления  $R$  при котором происходит уравнивание измерительного напряжения  $I \cdot R$ . Это произойдет тогда когда ток через гальванометр будет отсутствовать.

Для удобства работы с прибором  $R_y$  выбирается так, чтобы отношение  $E_n/R_y$  было числом, представленным в степени  $10^{-n}$ , где  $n$ -целое число. Этап вычислений исключается полностью, т.к. на шкалах магазина сопротивлений  $R_n$  наносятся числовые отметки, сразу дающие напряжение  $U_x$  в вольтах

Т.к. ЭДС «Нормального Элемента» имеет небольшую зависимость от температуры, то значение соотношения  $E_n/R_y$  может отличаться от круглого значения  $10^{-n}$ . Это соотношение восстанавливается переменным резистором в составе  $R_y$  перед измерением.

При помощи компенсаторов этого типа можно измерять ЭДС и напряжение весьма с высокой точностью, т.к.  $R_n$  и  $R_y$  могут иметь минимальную погрешность до 0,001 %.

#### Достоинства:

- + возможность измерения малых ЭДС и напряжений;
- + высокая точность измерений;
- + отсутствие потребления энергии их цепи первичного преобразователя.

#### Недостатки:

- сравнительно большие габариты и масса;
- неоперативность в работе (необходима методика измерений, занимающая много времени);
- не обеспечивается непрерывное слежение за изменением выходной цепи;
- неудобство автоматизации.

## 11.2 Автоматические компенсаторы постоянного тока

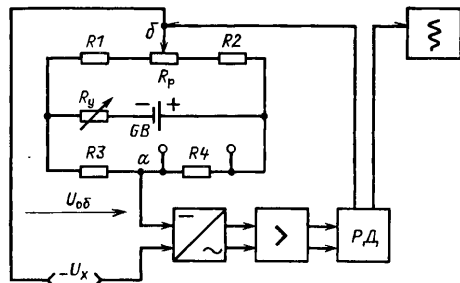


Рис. 11.2 Автоматические компенсаторы постоянного тока

Измеряемое напряжение  $U_x$  (рис. 11.2) компенсируется напряжением  $U_{об}$ , возникающим между точкой  $a$  и подвижным контактом  $b$  резистора  $R_p$ . Если компенсации нет, то некомпенсированная разность  $U_x - U_{об}$  усиливается усилителем и воздействует на реверсивный двигатель  $P.D.$ . Механическая связь двигателя с подвижным контактом  $b$

приводит к перемещению последнего в направлении обеспечивающим компенсацию измеряемого напряжения  $U_x$ , компенсируемым напряжением  $U_{об}$ . Двигатель, своим вращением, перемещает указатель вдоль шкалы

компенсатора обеспечивая возможность считывания показаний. Большинство автоматических компенсаторов имеют механическую запись показаний. Требуемое значение рабочего тока устанавливается при помощи резистора  $R_y$  включенного последовательно со стабилизированным источником напряжения. При правильной установке падения напряжения на резисторе  $R_4$  должно быть равно ЭДС нормального элемента. Для удобства контроля при помощи компенсатора используются зажимы 1 и 2. Погрешность не превышает 0,5 %. Порог чувствительности таких компенсаторов составляет доли милливольт.

### 11.3 Компенсаторы переменного тока

Переменное (синусоидальное) напряжение характеризуется заданием его амплитуды и фазы. Поэтому для компенсации одного синусоидального напряжения другим необходимо чтобы их частоты и амплитуды были равны, а фазы различались на 180 градусов.

Различают 2 вида компенсаторов переменного тока:

- полярно-координатные, в которых отдельно регулируется модуль компенсирующего напряжения и отдельно его фаза;
- прямоугольно-координатные, в которых компенсирующее напряжение  $U_k$  получается как сумма 2-х взаимно перпендикулярных напряжений, каждое из которых регулируется по величине.

Полярно-координатные потенциометры сложны в реализации фазорегулятора и применяются сравнительно редко.

*Прямоугольно-координатный компенсатор*

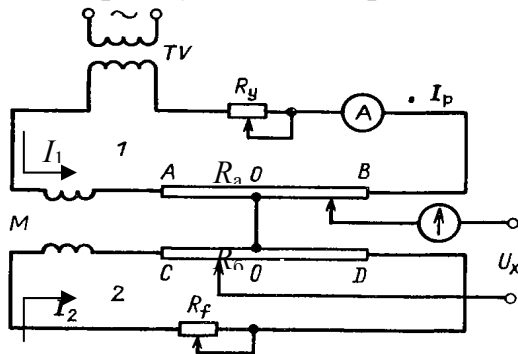


Рис. 11.3 Прямоугольно-координатный компенсатор

Цепь имеет два контура. Первый - контур тока  $I_1$  содержит измерительный резистор  $R_a$ , первичную обмотку катушки взаимной индуктивности  $M$ , амперметр  $A$ , и установочный резистор  $R_y$ . Второй - состоит из вторичной обмотки катушки  $M$ , измерительного резистора  $R_b$ , балластного резистора  $R_f$ . Середины измерительных резисторов (реохордов) соединены перемычкой  $OO$ . При подачи напряжения на

трансформатор  $T$ , в первом контуре возбуждается рабочий ток  $I_1$ . Он устанавливается переменным резистором  $R_y$  по показаниям амперметра  $A$ . Ток  $I_2$  во втором контуре определяется ЭДС  $E_2$  наведенной во вторичной обмотке катушки  $M$ . Сопротивление  $R_a$  и  $R_b$  выбираются столь большими, что ток можно практически считать совпадающим по фазе с ЭДС  $E_2$ , наведенной в обмотке вторичной катушки  $M$ .

Токи  $I_1$  и  $I_2$  имеют фазовый сдвиг  $90^\circ$ . Падение напряжения на реохордах  $AB$  и  $CD$  пропорционально токам  $I_1$  и  $I_2$ , поэтому  $U_a$  и  $U_p$  также сдвинуты относительно друг друга на  $90$ . Поскольку центры реохордов соединены перемычкой, их потенциал принимается равным нулю.

Напряжение, снимаемое с реохорда  $AB$ , является активной составляющей  $U_a$ , а напряжение, снимаемое с реохорда  $CD$ , — реактивной составляющей  $U_p$  полного напряжения  $U_K$ . Момент компенсации напряжений  $U_x$  и  $U_K$  отмечается по указателю нуля  $PG$ , в качестве которого может быть использован вибрационный гальванометр.

Две шкалы, относящиеся к реохордам  $AB$  и  $CD$ , градуируются в единицах напряжения. По этим шкалам считываются напряжения  $U_a$  и  $U_p$  соответственно.

## Тема 12. Измерительная информация. Методы её измерений и передач

Измерительной информацией называется сообщение о значениях измеряемых величин. Они выражаются и передаются от одних устройств к другим в виде сигналов, образованных путем модуляции какого-либо носителя.

Носителями могут служить:

- постоянный ток;
- переменный синусоидальный ток;
- импульсный ток.

### 12.1 Постоянный ток

Постоянный ток имеет только один параметр, в качестве которого используются – ток (или напряжение). Поэтому модуляция постоянного тока состоит в изменении тока (или напряжения). Модулированный сигнал выражается:

$$U_x(t) = U_0 + k \cdot x(t)$$

где  $U_0$  – значение несущего напряжения до модуляции;  
 $k$  – коэффициент усиления усилителя.

Устройство, изменяющее параметры одного сигнала под воздействием параметров другого сигнала называется модулятором.

Сигнал, параметры которого изменяются, называется – несущим.

Сигнал, управляющий параметрами несущего, называется – модулирующим

### 12.2 Переменное синусоидальное напряжение

Переменное синусоидальное напряжение характеризуется тремя параметрами:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$U_0$  – амплитудой;  $\omega_0$  – круговой частотой;  $\varphi_0$  – начальной фазой.

Индекс «0» – параметры до модуляции (т.е. несущие).

Модуляции могут подвергаться как 1 параметр, так 2 и 3 параметра одновременно.

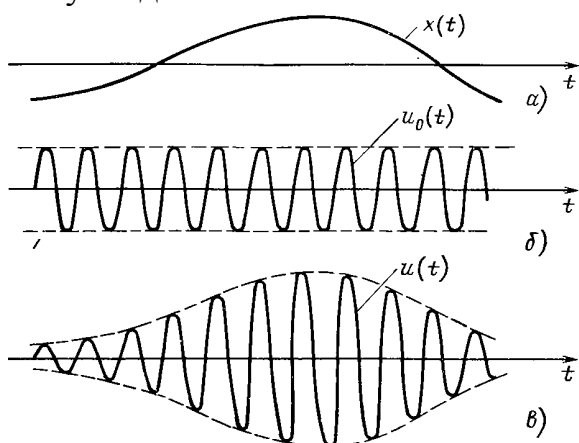
#### 12.2.1 Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции сигнал описывается выражением:

$$U(t) = (U_0 + kx(t)) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Коэффициент  $k$  выбирается таким образом, чтобы при всех возможных отрицательных значениях  $x$  соблюдалось условие  $U \geq 0$ . Следует отметить, что модулирующий сигнал  $x(t)$ , в отличие от носителя  $U_0(t)$  не является

синусоидальным.



$x(t)$  – функция (модулирующий сигнал)

$U_0(t)$  – несущий сигнал

$U(t)$  – модулированный сигнал

Огибающая (пунктир) повторяет по форме функцию  $x(t)$ .

Рис. 12.1 Амплитудная модуляция

Глубина модуляции:  $U_{\min}/U_{\max}=100\%$

Амплитудный модулятор (рис. 12.2 а) представляет собой усилитель  $У$  с управляющим коэффициентом усиления  $k_y$ . На один его вход подаются несущие колебания  $U_0(t)$  от несинусоидального генератора, а на другой вход – управляющий коэффициент усиления, т.е. величина линейно-связанная с информационным сигналом  $x(t)$ .

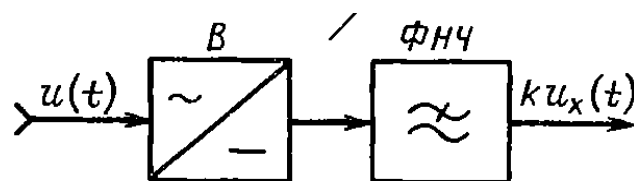
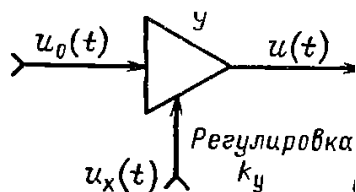


Рис. 12.2 Амплитудный модулятор (а) и демодулятор (б)

Восстановить модулированный сигнал можно с помощью амплитудного демодулятора (рис. 12.2 а). АД представляет собой сочетание выпрямителя  $В$  с фильтром низких частот  $ФНЧ$ , который сглаживает колебания частоты  $\omega_0$ , но пропускает более медленные колебания. Сигнал на выходе пропорционален  $x(t)$

Модуляция несинусоидального позволяет перенести спектр частот сигнала в требуемую область. Это бывает нужно тогда:

- когда канал связи используется для передачи нескольких сообщений вида  $x(t)$  от различных источников;
- если в канале связи диапазон частот соответствующий спектру  $x(t)$  занят сильными помехами;
- когда канал физически не может переносить сигналы низких частот спектра  $x(t)$ , но переносит сигналы более высокой частоты.

**Достоинства:**

- + перенос сигнала требует область частот и сравнительно узкий спектр частот.
- + простота модуляции и демодуляции
- + простота усиления

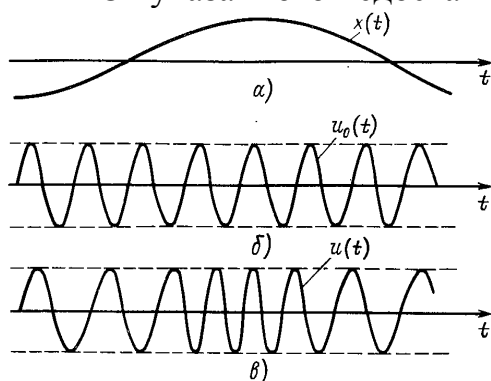
**Недостатки:**

- уменьшение амплитуды сигнала при большом сопротивлении канала

связи, это приводит к погрешности и возникает необходимость калибровки.

### 12.2.2 Частотная модуляция

От указанного недостатка свободна частотная модуляция.



Сущность метода в изменении несущей частоты по закону  $x(t)$ .

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + k \int x(t) dt + \varphi_0)$$

Практический процесс частотной модуляции состоит в том, что  $U_x(t)$  воздействует на частотный задающий элемент ЧЭ, определяющий частоту генератора  $\Gamma$ .

Рис. 12.3 Частотная модуляция

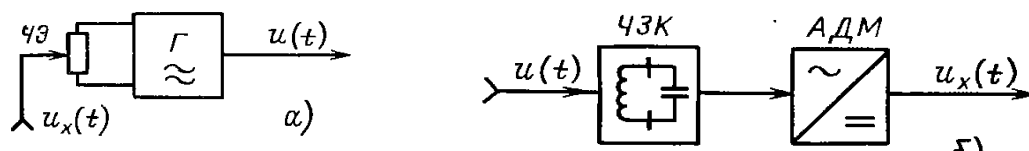


Рис. 12.4 Частотный модулятор (а) и демодулятор (б)

Демодуляция осуществляется разными методами.

Используется частотно-зависимый контур ЧЗК, амплитуда колебаний на выходе которого зависит не только от амплитуды входного напряжения, но и от его частоты. Он преобразует колебание, модулированное по частоте, в колебание, модулированное по амплитуде. За ним включается амплитудный демодулятор АДМ. Затем преобразование идет, как и при АДМ. В результате на выходе получается сигнал  $U_x(t)$ .

### 12.2.3 Фазовая модуляция

Заключается в изменении начальной фазы колебаний, при этом модулированный сигнал описывается выражением:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\phi k x(t) + \varphi_0)$$

Процесс фазовой модуляции состоит в воздействии входного сигнала на элемент задающего генератора, который определяет значение начальной фазы.

Демодуляция заключается в определении начальной фазы модулирующего сигнала путем сравнения её со значением начальной фазы несущего сигнала. Разность сигналов равна  $\Delta\phi k x(t)$ . Таким образом, для передачи опорного сигнала нужен дополнительный канал.

#### Достоинства фазовой и частотной:

- + высокая помехозащищенность.

#### Недостатки:

- сложность реализации модуляторов и демодуляторов;
- большая ширина канала, т.е. на одной линии получаем меньшее число каналов в сравнении с амплитудной модуляцией.

### 12.3 Импульсный ток или напряжение

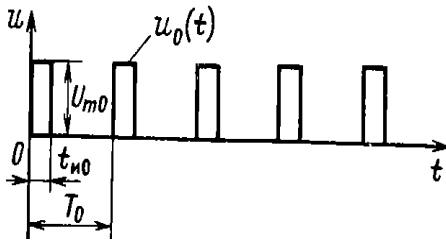


Рис. 12.5 Импульсный ток

Используется в качестве носителя информации, как и синусоидальное напряжение. Для этого берут периодическую последовательность импульсов прямоугольной формы, которые характеризуются следующими параметрами:  $U_0(t)$  – амплитудой,  $T_0$  – периодом,  $t_{и0}$  – временем импульса,  $\mu_0 = T_0/t_{и0}$  – скважность. Модуляции может подвергаться любой из этих параметров. Индекс 0 соответствует значениям параметров до модуляции.

#### 12.3.1 Амплитудно-импульсная модуляция

Состоит в изменении амплитуды импульсов по закону измеряемой величины  $x(t)$ .

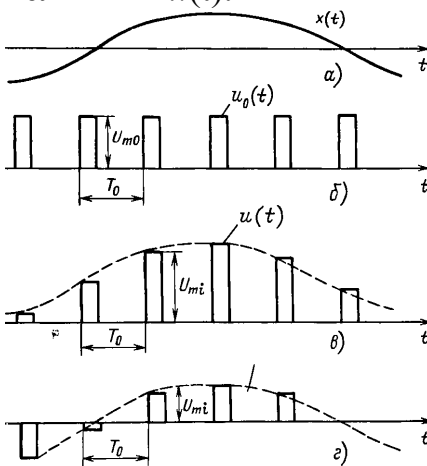


Рис. 12.6 Амплитудно-импульсная модуляция

Значения  $x$  берутся в моменты начала импульса, т.е. имеет место дискретизация функции  $x(t)$  по времени.

Огибающая амплитуд импульсов повторяет по форме кривую  $x(t)$ . Возможен вариант с изменением полярности импульсов в зависимости от знака.

Модуляция осуществляется также как и амплитудная синусного колебания.

На основной вход идет импульсный сигнал, а на вход, управляющий коэффициентом усиления усилителя - модулирующий.

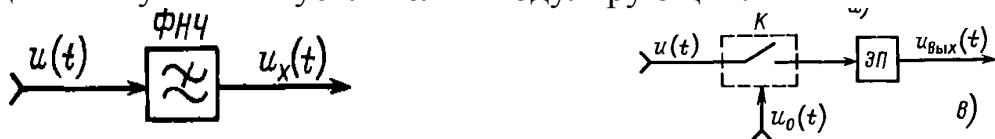


Рис. 12.7 Амплитудно-импульсный модулятор (а) и демодулятор (б)

Демодуляция выполняется при помощи ФНЧ (рис. 12.7 а), который задерживает высокие частоты несущего сигнала и пропускает частоту модулированного сигнала.

**Недостаток:** – малое время измерения  $U_{mi}$ .

Второй способ демодуляции состоит в том, что каждый очередной импульс амплитудой  $U_{mi}$  подаётся через ключ  $K$  на элемент памяти (рис. 12.7 б).

Пример элемента памяти – емкость усилителя постоянного тока. Элемент памяти хранит значение о  $U_{mi}$  до поступления следующего импульса. Ключ  $K$  замыкается на время действия импульса. Напряжение на выходе элемента памяти  $U_{ввых}(t)$  заменяет непрерывную прямую  $x(t)$

ступенчатой линией.

### 12.3.2 Частотно-импульсная модуляция

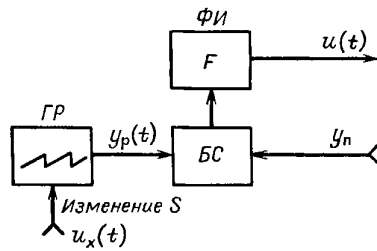


Рис. 12.8 Блок схема частотно-импульсного модулятора

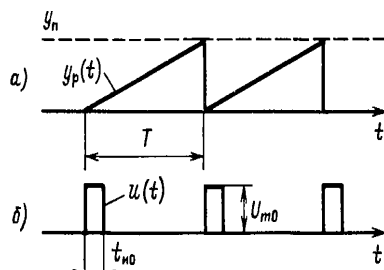


Рис. 12.9 Частотно-импульсная модуляция

Она заключается в изменении частоты импульсов следования по закону  $x(t)$ . Частотно импульсная модуляция реализуется путем воздействия на импульсный генератор по блок-схеме показанной на рис. 12.8.

Входной сигнал  $x(t)$  (рис. 12.9) линейно связанный с измеряемой величиной  $x$  управляет крутизной  $S$  генератора развертки  $U_p(t)$ .

Период  $T_0$  определяется временем нарастания  $U_p(t)$  до значения  $U_n$ . В момент равенства обнаруживается блоком сравнения  $БС$ , по команде которого формирователь импульсов выдает очередной импульс выходного сигнала  $U(t)$ . Формирователь импульсов формирует импульсы как с постоянной длительностью, так и с постоянной скважностью. Для формирования импульсов с постоянной скваженностью применяют двухтактную систему модуляции. Т.е.

такты развертки разделяют триггерным счетным устройством на четные и нечетные и выдают в течении нечетного периода развёртки импульс, а в течении четного- паузу. Тогда период выходного сигнала  $T' = 2T$ . Увеличив вдвое крутизну развертки вспомогательного генератора развертки можно получить тот же диапазон частот, что и в одноктактной схеме.

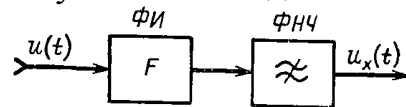


Рис. 12.10 Частотно-импульсный демодулятор

Простейший частно импульсный демодулятор (рис. 12.10) состоит из формирователя импульсов  $ФИ$  и фильтра низких частот  $ФНЧ$ .

Формирователь импульсов формирует импульсы по амплитуде  $U_m$  и длительности  $t_{и}$  так, чтобы выдерживалось условие  $U_m * t_{и} = const$ . А фильтр низких частот нужен для задержания в спектре этих импульсов высокие частоты и пропускает низкие соответствующие спектру функции, т.е.  $ФНЧ$  выделяет текущее среднее значение импульсного сигнала,

### 12.3.3 Широтно-импульсная модуляция

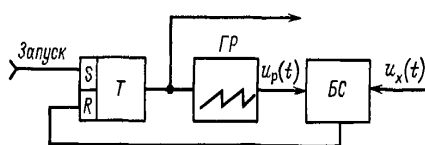


Рис. 12.11 Широтно-импульсный модулятор

Широтно-импульсная модуляция получается путем изменения импульсов  $t_{и}$  по линейной зависимости от дискретных ординат  $x_i$ , при этом период  $T_0$  и амплитуда  $U_m$  сохраняются постоянными. Для реализации широтно-импульсной модуляции используется метод развертывающего преобразования (рис. 12.11).



Генератор развертки  $ГР$  работает с периодом  $T_0$  и формирует пилообразное напряжение. Начало развертки определяется импульсом запуска на входе S-триггера.

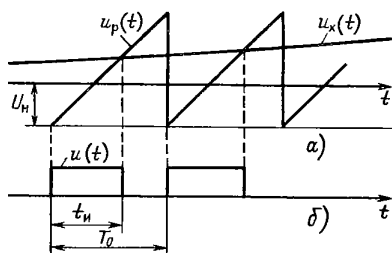


Рис. 12.12 Широтно-импульсная модуляция

линейно связан с сигналом  $U_x(t)$ . Это представлено наглядно на рис. 12.12

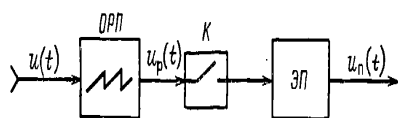


Рис. 12.13 Широтно-импульсный демодулятор

С приходом импульса на выходе триггера появляется логическая единица, на генераторе развертки начинает формировать пилообразное напряжение. Блок сравнения  $БС$  сравнивает напряжение развертки  $U_p(t)$  с напряжением  $U_x(t)$ . В момент их равенства блок сравнения выдает сигнал на вход  $R$  триггера переводящий триггер в состояние 0. Сформированный на выходе триггера импульс по длительности  $t_n$  будет

Самый простой широтно-импульсный демодулятор может быть построен по схеме частотно-импульсного демодулятора.

Внутренние отличия в том, что формирователь импульсов должен обеспечивать постоянство амплитуды  $U_m$  амплитуды  $t_n$  при равной его длительности на входе и на выходе.

#### 12.2.4 Фазо-импульсная модуляция

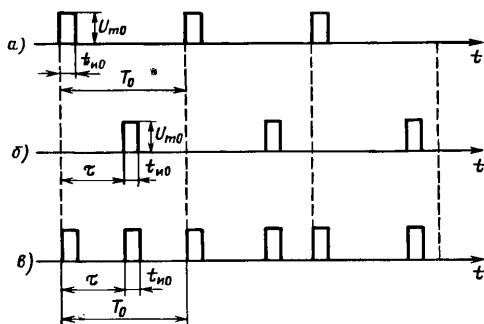


Рис. 12.14 Фазо-импульсная модуляция

В несущей последовательности импульсов можно смещать импульсы во времени располагая их не в начале каждого периода, а в любой его части. Смещение импульса по времени  $\tau$  соответствует смещению по фазе, т.е. фазу можно выразить в существенных единицах  $\varphi = \frac{\tau}{T}$  или в радианах  $\varphi = 2\pi \frac{\tau}{T}$ .

Для восстановления значений выходного фазо-модулированного сигнала его надо сравнить с несущей (опорной) последовательностью сигналов, а удобно передавать получателю информации сигнал полученный суммированием несущего и модулированного. При этом необходимо соблюдать условия, где  $\tau$  - фазовое смещение,  $t_{но}$  - длительность.

Суммированный сигнал получается с помощью дифференцирующего устройства выделяющего фронты импульсов и формирователя, выдающего импульсы длительностью  $t_{но}$ . При этом значения  $t_n$  в образующем сигнале равны значениям  $t_n$  исходному. Демодулировать фазоимпульсный модулированный сигнал можно, преобразовав его в широтно-импульсный сигнал с помощью триггера, который переводится в состояние 1 фронтом первого (опорного) импульса и возвращается в состояние 0 фронтом второго (отсчетного) импульса.

### Достоинства импульсной модуляции:

- + высокая помехоустойчивость.
- + возможность использования элементов импульсной техники для построения модуляторов и демодуляторов.
- + удобство преобразования сигналов в цифровую форму.

### Недостатки:

- сложность реализации модуляторов и демодуляторов.
- более широкий спектр, от которого следует что необходима большая ширина канала связи, т.е. на одной линии получается меньше число каналов в сравнении с амплитудной модуляцией.

## 12.2.5 Кодово-импульсная модуляция

Все виды импульсной модуляции основаны на изменении одного из параметров несущей последовательности импульсов. Возможно получение сигналов комбинированием импульсов. Процесс образования такого сигнала называется кодово-импульсной модуляцией. Она выполняется следующим образом.

Непрерывная функция  $x(t)$  подвергается дискретизации по времени с периодом  $T_0$  таким, чтобы на основании наборов дискретных ординат  $x_i$  можно было бы с достаточной точностью восстановить исходную функцию  $x(t)$ . Дискретизация - процесс получения отсчетов измеряемой величины в

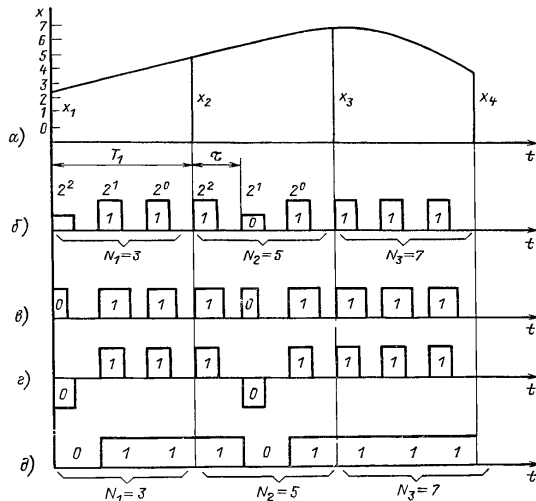


Рис. 12.15 Кодово-импульсная модуляция

определенные дискретные моменты времени. Затем каждое из полученных значений  $x$  подвергается квантованию, в ходе которого непрерывные значения величины заменяются значениями уровней квантования, т.е. вместо непрерывных значений величине приписываются значения ближайших уровней. Каждый уровень квантования представляется последовательностью сигналов, т.е. кодом. Чаще всего применяются коды из элементов имеющих только два значения (0 и 1). Тогда при преобразовании сигнала каждый элемент кода выражают импульсом, у которого один из параметров (амплитуда или импульс) принимают два значения, т.е. символ 1-выражается импульсом, а 0-отсутствием импульса. При выборе в качестве измерительного параметра амплитуды иногда символы 1 и 0 выражают равными по модулю, но противоположными по полярности.

Пусть входной сигнал квантуется по 9 уровням (рис. 12.15) и принимает в момент времени  $t_1, t_2, t_3$  значения  $t_1=3, t_2=5, t_3=7$  и т.д. Несущие импульсы имеют постоянный период  $T_1$ . Малая длительность импульса

соответствует 0, а большая - 1.

Если 0 кодируется импульсами малой амплитуды, а 1- импульсами большой амплитуды, то выходной сигнал будет иметь вид, показанный на рис 12.15 б.

Если 0 и 1 квантуются импульсами разной полярности, то выходной сигнал будет иметь вид, показанный на рис. 12.15 в.

Передача каждой из 4 кодовых операций должна занимать интервал времени  $T_n \leq T_0$ . При использовании всего интервала  $T_n = T_0$  на каждый элемент  $\tau$  приходится  $\tau = T_0/4$ . Частотная полоса спектра импульсного сигнала растет с уменьшением длительности импульса или паузы.

Демодуляция кодово-импульсного сигнала осуществляется с помощью специальных декодирующих устройств. Для привязки начала в её вводят элемент синхронизации (может использоваться дополнительный импульс и т.д.).

Кодовый сигнал подается на вход приемника селектора синхроимпульсов, который выделяет из входа сигнала синхроимпульсы на вход коммутатора. Коммутатор поочередно подключает выходы приемника к входам элементов памяти ЭП1...ЭП4, таким образом, чтобы первый импульс кодовой индикации запоминал элемент памяти ЭП1. Второй импульс – ЭП2 и т.д. Дешифратор считывает информацию с элементов памяти и выдает сигнал на устройство отображения информации. Синхроимпульсов устанавливается в исходное состояние, а дешифратор отключается от элементов памяти.

**Достоинства:**

- высокая помехоустойчивость.
- для получения хранения и преобразования можно использовать элементы цифровой техники.
- возможность интегрального исполнения.

**Недостатки:**

- потеря информации при дискретизации.
- погрешность при квантовании (при большом шаге квантования).

## Тема 13. Фотоэлектрические преобразователи (оптоэлектронные)

В основу всех электронных приборов входят электронные приборы.

В современные измерительные системы входят электронные приборы.

Но они имеют недостатки:

- низкая помехозащищенность (необходимость экранирования);
- высокая стоимость;
- большая масса первичных измерительных преобразователей и линий связи;
- необходимость электрической изоляции;
- сложность миниатюризации;
- ограниченный диапазон частоты входного сигнала.

Большинство из указанных недостатков обусловлены тем, что для преобразования информации используются заряженные частицы. Устранение этих недостатков возможно при совместном использовании электронных и оптических методов и средств измерений (оптоэлектроника).

Элементную базу оптоэлектроники составляют оптоэлектронные приборы, использующие для своей работы энергию электромагнитного излучения оптического диапазона. Т.е. в оптоэлектронных устройствах передача осуществляется электрически нейтральными фотонами.

Оптоэлектронные приборы имеют следующие преимущества:

- широкий частотный диапазон  $10^{14}$  Гц.,
- высокая помехоустойчивость к внешним электромагнитным полям и отсутствию взаимных наводок в линии связи при передаче информации,
- отсутствие обратного воздействия приемника на источник информации,
- возможность миниатюризации преобразователей - переход к интегральной оптике.

### 13.1 Основные компоненты оптоэлектронных преобразователей

В общем случае оптоэлектронные преобразователи представляют собой совокупность источника излучения оптической системы, оптического канала, приемника излучения и модулятора.

Источники света – могут быть когерентными (лазер) и некогерентными (лампа накаливания, светодиоды). Они могут быть связаны с объектом преобразования и могут быть независимы от него.

Оптическая система – предназначена для перераспределения в пространстве потока воспроизведения (фокусировка, формирование нескольких потоков, изменение направления, вращение плоскости поляризации).

Оптический канал – предназначен для переноса лучистой энергии. Типы каналов. Различают неуправляемые (воздух) и управляемые (светодиодные). Каждый канал характеризуется возможностью изменения направления светового потока.

Приемник излучения – преобразует падающий на него поток света в

электрический сигнал.

Модулятор – предназначен для управления параметрами излучения при воздействии на него входной величины (мощность, спектральный состав, плотность поляризации и т.д.). Модуляторами могут быть резисторы управляющие источникам излучения, жалюзи - подвижные звенья, призмы, растровые решетки и т.д.

## 13.2 Источники излучения

Для генерации оптического канала используются 2 излучения.

*Тепловое излучение.* Когда энергия излучения образуется за счет преобразования тепловой энергии т.е. излучения нагретого до высокой температуры тела. Лампочка накаливания.

*Люминесцентное излучение.* Энергия излучения образуется путем преобразования энергии всех других видов кроме тепловой.

В зависимости от характера распределения энергии излучения по полосе частот (спектр) источники излучения делятся на источники с непрерывным, полосовым и линейчатым спектром и источники смешанного типа у которого наряду со смешанным спектром имеются заметные полосы или линии излучения.

### 13.2.1 Источники теплового излучения.

*Электрические лампы накаливания* представляют собой твердое тело, заключенное в прозрачный баллон из которого выкачан воздух или закачан нейтральный газ – аргон. Твердое тело разогревается электрическим током. Температура нити накаливания порядка 2900 К. Причем тем больше мощность, тем больше необходима колба. Электрические лампы накаливания применяют в качестве источников излучения в инфракрасной и видимой области спектра.

#### **Достоинства ЭЛН:**

– удобство эксплуатации, малый период возгорания, работает при постоянном и переменном токе, включается в сеть без дополнительных устройств;

– сплошной широкий спектр излучения;

– малую стоимость и высокая надежность;

– возможность подключения источников с широким диапазоном мощностей.

#### **Недостатки ЭЛН:**

– низкая световая отдача (световой КПД осветительных ламп составляет 1–3%, КПД 60W лампочки равен 2,1%.);

– спектральный состав ламп накаливания существенно отличается от спектрального состава солнечного излучения (желтизна света).

– невысокая долговечность (1500 часов).

– высокая инертность (невозможность высокочастотной модуляции путем изменения напряжения питания);

– отсутствие направленности излучения.

**Галогеновые лампы накаливания** – лампа накаливания, в колбу которой вводится небольшое количество галогена (йод, бром). Колбы ламп изготавливают из кварца или тугоплавкого стекла, так как для обеспечения галогенного цикла они должны нагреваться до 573 К.

**Достоинства:**

- изготавливаются в компактном виде (создание галогенного цикла);
- используется большое рабочее давление внутри лампы, что приводит к уменьшению скорости испарения нити;
- срок службы 2000-3000 часов (за счет галогенного цикла – оседания вольфрама обратно на нити);
- температура свечения 3400 К (появляется оттенок дневного света);

**Недостаток:** поверхность колбы не допускает наружного загрязнения (из-за высокой температуры это может привести к ее разрушению).

**Силиконовый излучатель (глобар).** Представляет собой стержень из карбида кремния, нагреваемый электронным током. Рабочая температура 1200-1400К. При покрытии слоя двуокиси тория рабочая температура повышается до 2273К. При температуре 1773К и выше элемент излучает широкий спектр ИК-излучения.

**Штифт Нернста.** Изготавливают из оксидно-керамической массы, содержащей окиси циркония и иттрия. К концам цилиндра припаиваются платиновые проводники. Т.к. штифт является диэлектриком в холодном состоянии, его изначально разогревают дополнительным источником нагревателя. Для уменьшения потерь штифт помещают в кожух, в котором монтируется окно из материала, прозрачного для заданной области излучения. Температура нагрева штифта Нернста достигает 2000 К.

### 13.2.2 Люминесцентные источники излучения

Люминесценцией называется излучение вещества сверх его теплового излучения под воздействием подводимой к нему в той или иной форме энергии. Такое вещество называется люминофором. Природные явления люминесценции – северное сияние, свечение насекомых, минералов.

Люминесценция классифицируется по:

1. по типу возбуждения;
2. по механизму преобразования энергии;
3. по временным характеристикам свечения.

К первому типу относятся:

- фотолюминесценция (излучение под воздействием поглощенного излучения оптической области света);
- радиолюминесценция;
- катодолюминесценция;
- электролюминесценция;
- триболлюминесценция;
- хемиллюминесценция.

По механизму преобразования энергии различают:

- резонансная

- вынужденная
- спонтанная
- рекомбинационная

По временным характеристикам свечения бывают:

- флуоресценцию (быстро затухающая люминесценция время жизни  $10^{-9}$ - $10^{-6}$  с)
- фосфоресценция (длительная люминесценция ( $10^{-3}$ -10 с))

Деление это условное, т.к. нельзя указать строго определенную временную границу, т.е. она зависит от временного разрешения регистрирующих приборов.

Наибольшее применение в оптоэлектронике получили электро-, фото- и катодолюминесценция.

**Люминесцентные лампы** Широко применяются в качестве источников света общего назначения, в копировальных аппаратах, в медицине для обеззараживания помещения и т.д.

Люминесцентные лампы представляют собой стеклянную колбу, с нанесенным на внутреннюю поверхность люминофором. В торцы трубки введены вольфрамовые спиральные электроды. Внутри трубки помещают несколько миллиграмм ртути и закачивают некоторое количество инертного газа.

Люминесцентная лампа, в отличие от лампы накаливания, не включается напрямую в электрическую сеть. Так как необходимо: предварительно прогреть электроды, дать импульс высокого напряжения и обязательное ограничение тока во время работы, который во время работы многократно возрастает. Поэтому применяют специальные устройства – балласты.

Работа люминесцентной лампы заключается в следующем: при подключении люминесцентных ламп к источнику питания, разогретые электроды испаряют ртуть, тем самым возбуждая её свечение. В свою очередь излучение разряда возбуждает свечения слоя люминофора лампы. Дальнейший нагрев электродов поддерживается энергией разряда и внешняя цепь нагрева электрода выключается.

#### **Достоинства:**

- большой срок службы 10 тыс. часов;
- отличное восприятие света;
- высокая стабильность светового потока около 95 % к концу службы лампы.

#### **Недостатки:**

- долгий запуск (1-3 сек);
- лампа светит на полную яркость только через 10-15 минут работы;
- использование специального пускового устройства;
- утилизация;
- мерцание лампы с удвоенной частотой сети, возникновение стробоскопического эффекта;
- низкочастотный гул (100Гц), исходящий от дросселя;
- большие габариты и масса;
- ограниченный температурный диапазон работы (0-25<sup>0</sup>С).

**Энергосберегающие лампы** – это люминесцентные лампы с электронным балластом. Под действием высокого напряжения происходит движение электронов, которые сталкиваясь с атомами газа, испускают УФ излучение, которое возбуждает люминофор. ( $T = -10+50^{\circ}\text{C}$ ;  $t > 5$  тыс. ч.)

**Газоразрядный источник** представляет собой колбу с впаянными электродами: анодом и катодом. Если между электродами приложить напряжение, то свободные ионы, перемещаясь к катоду ускоряются и выбиваются из него электроны, которые перемещаясь к аноду ионизируют газ, поддерживая непрерывность процесса.

Спектр каждого источника зависит от рода газа или пара, т.е. от примесей, температуры свечения и давления в колбе.

При низких давлениях и температуре спектр газоразрядных источников линейчатый. При повышении температуры линии спектра расширяются. Рабочие температуры 4500-7000 К.

**Достоинства:**

- возможность модуляции излучения путем изменения частоты питания ( $f=30$  кГц);
- мощный световой поток;
- высокий световой КПД до 30%.

**Недостатки:**

- сложная схема питания;
- высокие напряжения питания.

**Светодиод или светоизлучающие диоды** – это полупроводниковый прибор, излучающий некогерентный свет при пропускании через него электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра. Его цветовые характеристики зависят от химического состава полупроводника.

Работа светодиода основана на явлении инжекционной электролюминесценции, т.е. генерации оптического излучения в p-n переходе. Находящимся под прямым внешним напряжением.

Для материала полупроводника перехода материалы: фосфид галлия GaP, GaAs. (галлий – мышьяк (арсениум)), ZnSe (цинк – селен) и др. и некоторые тройные соединения GaAlAs (галлий – алюминий – мышьяк).

Изменяя состав полупроводников можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS).

Светодиоды описываются двумя группами параметров: оптическими и электрическими.

К оптическим относятся:

- излучательная характеристика - это зависимость относительного значения потока излучения к протекающему току.
- спектральная характеристика- зависимость относительного значения потока измерения от длины волны.
- диаграмма направленности - зависимость относительного значения потока излучения от направления распространения



- длина волны излучения ( $\lambda$ ), на которой значение потока максимальна
- яркость (сила света).

К электрическим относятся:

- время включения-выключения (частота).
- ВАХ по которой определяются:
  - максимально допустимые прямое и обратное напряжение
  - максимальный прямой ток

#### Достоинства:

- + малые габариты;
- + линейная зависимость световых параметров от тока,
- + безинерционность включения-выключения (<100 нс
- + малое тепловыделение;
- + устойчивость к механическим воздействиям и вибрациям;
- + большой срок службы около 100 тыс. ч.;
- + встроенное светораспределение; неприменяемость опасных веществ.

#### Недостатки:

- разброс параметров в одной партии;
- невысокая мощность излучения;
- зависимость яркости от температуры;
- зависимость полярности питания.

**Лазеры.** Под лазером понимают устройство, испускающее в видимом спектре когерентную электромагнитную лучистую энергию в диапазоне от сверхкороткого ультрафиолетового до сверхдлинного инфракрасного излучения.

Все лазеры состоят из трех основных конструктивных блоков:

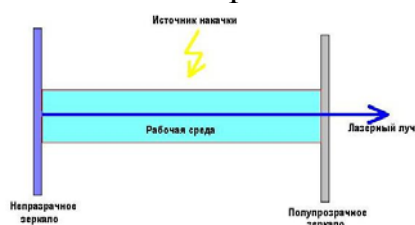


Рис. 13.1 Схема лазера

1. Активная (рабочая) среда. Активная среда представляет собой вещество, в котором создается инверсная заселенность. Она может быть:

- твердой - кристаллы рубина или алюмо-иттриевого граната, стекло с примесью неодима в виде стержней различного размера и формы;

формы;

- жидкой - растворы анилиновых красителей или растворы солей неодима в кюветах;
- газообразной - смесь гелия с неоном, аргон, углекислый газ, водяной пар низкого давления в стеклянных трубках.

В зависимости от типа активной среды лазеры называются рубиновыми, гелий-неоновыми, на красителях и т.п.

2. Источник энергии (накачки). (оптическая накачка, возбуждение электронным ударом, химическая накачка и т.п.

3. Резонансная полость (оптический резонатор) с емкостным устройством - обычно два зеркала. Оптические резонаторы бывают с плоскими зеркалами, сферическими, комбинациями плоских и сферических и др. Резонатор представляет собой пару зеркал, которые располагаются параллельно друг

другу. Между этими зеркалами помещается активная среда.

Существующие Л. различаются:

- 1) рабочей средой (твёрдые диэлектрики, полупроводники, газы, жидкости);
- 2) способом создания в среде инверсии населённости, или, как говорят, способом накачки.
- 3) конструкцией резонатора;
- 4) режимом работы (импульсный, непрерывный).

Первое из зеркал отражает весь падающий на него свет. Второе зеркало полупрозрачное, оно возвращает часть излучения в среду для осуществления вынужденного излучения, а часть выводится наружу в виде лазерного луча. Резонатор можно настроить таким образом, что лазер станет генерировать излучение только одного, строго определенного типа (моду). Настройка осуществляется путем подбора расстояния между зеркалами.

#### **Достоинства полупроводниковых лазеров:**

- + очень большие коэффициенты усиления  $\sim 10^2$ - $10^3$  см<sup>-1</sup>, поэтому размеры полупроводникового Л. могут быть сделаны очень малыми (GaAs, CdS, InAs, InSb, ZnS и др.)
- + позволяют почти полностью перекрыть видимый и ближний инфракрасный диапазоны
- + очень высоким КПД преобразования электрической энергии в когерентное излучение (близким к 100%)
- + работа в непрерывном режиме.

#### **Недостатки:**

- невысокая направленность излучения, связанная с их малыми размерами,
- трудность получения высокой монохроматичности.

Полупроводниковые Л. используются с наибольшей эффективностью в тех случаях, когда требования к когерентности и направленности не очень велики, но необходимы малые габариты и высокий КПД.

### 13.3 Приёмники излучения

Приёмник излучения – устройство предназначенное для преобразования энергии оптического излучения в другие виды энергии (сигналы другой физической природы) или в оптическое излучение с другой длиной волны с целью их обнаружения и использования информации, которую они несут.

Приёмники излучения подразделяются на следующие типы:

- *фотоэлектрические*. Принцип действия основан на непосредственном значении их электрических свойств под воздействием излучения, т.е. явлении внешнего и внутреннего фотоэффекта (испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения). К ним относятся: фотодиоды, фоторезисторы, фотоумножители и т.д.

- *тепловые*. Принцип действия основан на преобразование оптической энергии сигнала в теплоту, а потом в электрическую цепь.

По чувствительному элементу тепловые приемники излучения делят: с твердым веществом (термоэлементы – появление термоЭДС; болтомеры – при поглощенном излучении изменяется сопротивление электрическому току); с газовым веществом (оптико-акустические - увеличение объема газа с поглощением излучения; счетчики фотонов – ионизация газа вызывает в нем электрический разряд, т.е. регистрируется импульс).

- *фотохимические*. Преобразуют оптическое излучение в химическую энергию.

На ряду с одноэлементными приемными элементами используются многоэлементные с отдельными приемными элементами с дискретно или неравномерно распределенными по поверхности. Они служат для получения двумерного объекта от излучения (фотопластинки, фотопленки, тепловизерные матрицы и т.д.) .

#### 13.3.1 Параметры и приемников излучения.

##### *Световые параметры*

– *интегральная чувствительность* – чувствительность к монохроматическому (интегральному) потоку излучения

– *монохроматическая чувствительность* – чувствительность к монохроматическому излучению

– *квантовая чувствительность* – отношение числа квантов вызвавших фотоэффект к суммарному числу квантов, попавших на приемник излучения.

##### *Временные параметры.*

*Собственная постоянная времени.* К ней относятся: постоянная спада  $\tau_{сп}$  и постоянная нарастания  $\tau_{н}$ . Интервал времени после прекращения облучения, по истечении которого спадающее по экспоненте напряжение фото-сигнала, уменьшается в  $1/e$ -раз называется постоянной спада  $\tau_{сп}$ . Интервал времени от начала облучения до приемника излучения до момента,

когда нарастающие по экспоненте напряжение достигнет величины  $(1-1/e)$ , т.е. 63%) от установившегося значения при длительном облучении называется постоянной нарастания.

Разброс постоянной спада и постоянной нарастания для однотипных приёмников излучения не превышает 5-10%. У некоторых приемников излучения постоянная спада  $\tau_{сп}$  неравна постоянной нарастания  $\tau_{н}$ . У фоторезисторов интервал времени нарастания или спада определяется временем жизни носителей, У фотодиодов - временем полета носителей от места преобразования до р-п перехода. У фотоэлементов временем полета носителей от фотокатода к аноду с учетом их неизохромности (неодновременного прилета на анод, что дает задержку). У тепловых приемников- временем тепловых процессов.

*Граничная частота ( $f_{гр}$ )* показывает частоту синусоидально-модулированного потока излучения, при которой чувствительность порога излучения падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном излучении вследствие его инерционности.

### ***Электрические параметры***

*Сопротивление приемника излучения.* Параметр особо важен при выборе и расчете схемы включения. Для фоторезисторов различают тепловое сопротивление  $R_T$  (измеряется при отсутствии облучения приемника) и световое сопротивление  $R_c$  (измеряется при установившейся освещенности 20 люкс и  $T=20$  градусов Цельсия). Отношение теплового к световому называется кратностью фоторезистора  $K=R_T/R_c$ . Для фотодиодов применяется параметр дифференциального сопротивления  $R_d=dU/dI$  отношение малого приращения напряжения сигнала к фототоку при заданной освещенности.

*Емкость приемника излучения* – электрическая емкость. Вместе с сопротивлением определяют постоянную времени релаксации ( $\phi_{рел}=C \cdot R$ ) электрической цепи приемника излучения.

### ***Эксплуатационные параметры***

*Рабочее напряжение* – напряжение выдаваемое приемником излучения.

*Максимальная рассеиваемая мощность* при которой обеспечиваются номинальные параметры источника излучения при длительной работе при заданных условиях.

### **13.3.2 Характеристики приемников излучения.**

***Зависимость параметров источника излучения от мощности излучения:***

*Вольтамперная характеристика* - зависимость тока через приемник излучения от напряжения питания при фиксированном потоке излучателя  $I(U)$ . Эта характеристика определяет электрические свойства, рабочую схему и выбор рабочего интервала.

*Люксоммическая характеристика* - зависимость светового

сопротивления от освещенности  $R_c(E_v)$ .

*Энергетические характеристики*

- зависимость напряжения фотосигнала от потока излучения (чем больше поток излучения тем больше электрический сигнал).

- зависимость фототока от излучения. Характерна для фоторезисторов.

**Частотная характеристика** - зависимость чувствительности  $S$  приемника излучения от частоты модуляции потока излучения. Характеристика определяется постоянной времени  $\tau$ . Чаще принимают

$$f_{гр} = \frac{1}{3\tau}$$

**Фазовая характеристика** - зависимость сдвига фазы гармонической составляющей выходного тока относительно соответствующей ей гармонической составляющей потока излучения от частоты модуляции.

**Спектральная характеристика** - зависимость чувствительности приемника излучения от длины волны падающего на него излучения.

**Пространственная характеристика:**

**Зонная характеристика** - зависимость чувствительности от положения светового пятна на светочувствительном элементе.

**Диаграмма направленности** - зависимость чувствительности от направления поляризации.

### 13.3.3 Фотоэлектрические приемники излучения

Приемники излучения – приемники работа, которых основана на внутреннем фотоэффекте, т.е. взаимодействии падающих квантов излучения с кристаллической решеткой полупроводника, в результате которого происходит ионизация атомов в кристаллической решетки с образованием свободных носителей заряда электронов и дырок. Существуют 2 формы внутреннего фотоэффекта: эффекта внутренней проводимости и фотогальванический.

Полупроводники, имеющие примеси называются примесными, а проводимость – примесной. Примесь отдающая электроны в зону проводимости называют донором, а проводник – n- типа.

Примесь, захватывающая электроны называется акцепторной, а полупроводник – p-типа.

Для полупроводников p и n типа, фотопроводимость возникает если электрон получает энергию  $h\nu \geq W_d$  или  $h\nu \geq W_a$  соответственно.

**Фоторезистор**

Фоторезистор – приемник излучения, работа которого основана на эффекте фотопроводимости.

Фоторезисторы неполярны, т.е. проводят ток в любом направлении и могут работать, как на постоянном так и переменном напряжении. Они

создаются на базе собственного и примесного (для ИК области) поглощения. Наиболее распространены неохлажденные Фоторезисторы на собственной проводимости.

**Достоинства:**

- + малые геометрические размеры и масса;
- + низкое напряжение питания;
- + высокая интегральная чувствительность;
- + большая мощность рассеивания.

**Недостатки:**

- повышенная инерционность;
- зависимость от температуры (при повышении температуры время спада уменьшается);
- малая величина линейной зоны энергетической характеристики.

**Фотодиоды**

Фотодиодами называют полупроводниковые приборы, основанные на внутреннем фотоэффекте, использующие одностороннюю проводимость р-п перехода, при освещении которого появляется ЭДС (фотогальванический режим) или изменяются значения обратного тока (фотодиодный режим).

Простейший фотодиод представляет собой обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на р-п переход. При таком воздействии в результате поглощения фотонов с энергией больше чем ширина запрещенной зоны в п- области возникают пары фото-носителей электрон-дырка. При диффузии вглубь области основная доля электронов и дырок не успевает рекомбинировать и доходят до границы р-п перехода, причем дырки переходят в р-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы п-области, т.е. фотоносители дырки заряжают р-область положительно, а электроны заряжают п-область отрицательно. Возникающая разность потенциалов называется фото ЭДС, а эффект возникновения – вентильный эффект.

Для обеспечения высокой чувствительности к излучению необходимо, чтобы диффузионный ток был минимален, поэтому фотодиоды работают без внешнего напряжения как источник ЭДС (фотогальванический режим) или при обратном внешнем напряжении (фотодиодный режим).

## Литература

1. Тищенко, О.Ф. Элементы приборных устройств. Основной курс. В 2 ч. /Под ред. О.Ф.Тищенко - М.: Высшая школа. Ч. 1 - 328 с. Ч. 2 - 232 с.
2. Панов, В.А. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В.А. Панов. - Л.: Машиностроение, 1980. - 742 с.
3. Евтихийев, Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин. Учеб. пособие для вузов /Н.Н. Евтихийев и др.; под общей редакцией Н.Н. Евтихийева. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 352 с.
4. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: Учебное пособие для машиностроительных спец вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов – М.: Высшая школа, 1998. – 447 с.
5. Миловидов, С.С. Детали машин и приборов: Учебное пособие для вузов / С.С. Миловидов – М.: Высшая школа, 1971. – 488 с.
6. Андреева, А.Е. Упругие элементы приборов / А.Е. Андреева - М.: Машиностроение, 1981. - 392с.
7. Милосердин, Ю.В. Расчет и конструирование приборов и установок. Справочник / Ю.В. Милосердин, Ю.Г. Лакин - М.: Машиностроение, 1978: - 320 с.
8. Асе, Б.А. Детали авиационных приборов / Б.А.Асе, Е.Ф. Антипов, Н.М. Жукова - М.: Машиностроение, 1979. - 232 с.
9. Якушенков, Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.
- 10.Новицкий, П.В. Электрические измерения неэлектрических величин /Под ред. П.В. Новицкого. - Л.: Энергия, 1975. - 576 с.
- 11.Боднер В.А. Измерительные приборы / В.А. Боднер, А.В. Алферов - М.: Изд. стандартов, 1986, 390 с.