

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.С. Галимов, В.И. Ильин, Л.Р. Саримов

**Элементы  
информационно-измерительных  
систем электрооборудования  
транспортно-технологических  
машин и комплексов**

Набережные Челны  
2017

**УДК 629.33.06: 621.317**

**ББК 31.26-049**

**Г 15**

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, доцент *А.З. Гумеров*;

кандидат технических наук, доцент *Р.Г. Марданшин*.

**Галимов Н.С., Ильин В.И., Саримов Л.Р.**

**Г15 Элементы информационно-измерительных систем электрооборудования транспортно-технологических машин и комплексов:** учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – 2-е изд., доп. – Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр НЧИ К(П)ФУ, 2017. – 295 с.: ил.

В учебном пособии рассмотрены методы и первичные технические устройства преобразований в автомобилестроении и других областях народного хозяйства. Излагаются принципы действия, назначения, теории и выводы расчетных формул параметров преобразователей, способствующих развитию у студентов творческого конструкторского мышления.

Задачей учебного пособия является общеинженерная подготовка студентов вузов, обучающихся по техническим специальностям, служащая базой для их последующей специальной конструкторской подготовки в дальнейшей деятельности.

**УДК 629.33.06: 621.317**

**ББК 31.26-049**

© Галимов Н.С., Ильин В.И., Саримов Л.Р., 2017

© НЧИ К(П)ФУ, 2017

## **Введение**

Основным показателем современного научно-технического прогресса является интенсификация технологических процессов, повышение мощностей и производительности оборудования, а также связанное с ними развитие технических средств и систем управления. Автоматизированные системы управления не только технологическими процессами, но и транспортными средствами требуют значительного количества и разнообразия средств измерений, обеспечивающих выработку сигналов измерительной информации в форме, удобной для дистанционной передачи и сбора, преобразования и обработки.

При рассмотрении автоматических систем определяющим становится информационный подход.

Любая система автоматического управления или регулирования состоит из объекта управления, преобразователя (датчика), усилителя, исполнительного элемента (сервомотора) и управляющего устройства.

Для управления технической системой или некоторым его узлом необходима определенная информация о состоянии этой технической системы или узла. В целом такой информацией могут быть: скорость движения, ускорение, крутящий момент, освещенность, температура среды или узла и т.д. Объем и качество необходимой информации для объекта регулирования зависят от назначения системы управления и удачного выбора преобразователей.

Получение информации осуществляется с помощью информационно-измерительных устройств – преобразователями. В некоторых источниках преобразователи транспортных машин, технологического оборудования, роботов называются датчиками. Преобразователь – это первичное в системе регулирования или управления техническое устройство, состоящее из чувствительного элемента и преобразователя информации чувствительного элемента, обеспечивающее взаимодействие движущихся через него материальных потоков, которые могут находиться в любом фазовом состоянии (твердое, жидкое, газообразное и плазменное).

В данном пособии наряду с традиционными преобразова-

телями автоматики рассмотрены преобразователи, принципы действия которых основаны на современных знаниях поведения материалов в зависимости от воздействия на них окружающей среды. Перечислены дискретные преобразователи, которые наиболее полно удовлетворяют современной системе управления автомобилей, компьютерной технологии измерения различных параметров производственного процесса.

Изложены принципы построения и применения промежуточных элементов, таких как электрические мосты постоянного и переменного токов, элементарных логических элементов, дешифраторов и т.д.

Задачей книги является также подготовка студентов к последующему самостоятельному изучению специальной технической литературы и монографий по измерительным приборам в автоматике.

## **ГЛАВА 1. Теоретические основы**

### **1.1. Информационные системы**

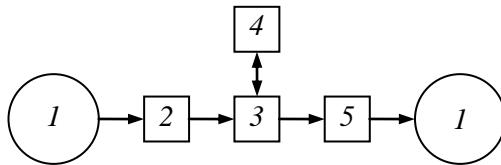
С развитием материи происходит усложнение форм обращения. Появляются формы отражения, раздражимость, ощущение восприятия, представление и мышление. В каждой форме происходит только ей присущие специфические процессы. Информация в живой природе играет особую роль и участвует в управлении всеми жизненными процессами. Информационным процессом называется процесс, возникающий в результате установления связи между объектами материального мира: источником (генератором) информации и ее приемником (получателем).

Важным понятием определения информации является сигнал, тесно связанный с понятием вещественно-энергетической опосредованности информационного процесса. Сигнал является материальным носителем информации (предмет, явление, процесс). Везде, где есть материальные системы, следствием чего является наличие отражения, имеет место и передача информации. Особым видом сигналов являются знаки, которые, в отличие от сигналов естественного происхождения, создаются самоорганизующимися системами и предназначаются для передачи и хранения информации. В информационной системе можно выделить следующие подсистемы:

1. Восприятия информации (рецептивная система).
2. Информация.
3. Коммуникация.

Особенностью информационной системы является наличие структуры энергетических и вещественных связей, которая отражает свойства объектов внешнего мира и внутренней среды самоорганизующейся системы. Их называют информационными связями. На рис.1.1 приведена функциональная схема информационной системы.

Внешний мир, включая и внутреннюю среду самоорганизующейся системы 1, воздействует на подсистему восприятия информации 2, то есть на рецептивную систему. В этом отношении он выступает как источник информации.



**Рис. 1.1. Функциональная схема информационной системы: 1- внешний мир; 2- подсистема восприятия информации; 3- интерпретирующая подсистема; 4- внешний мир; 5- подсистема коммуникации**

Подсистема 2 отбирает информацию не от всех взаимодействующих с нею физических процессов, а лишь определенных, присущих только данной информационной системе. В этом и заключается главная функция рецептивной подсистемы. Кроме

того, она входит как согласующее звено входного сигнала по различным параметрам. Интерпретирующая подсистема информационной системы 3 является системой обработки информации и модели внешнего мира 4. Подсистема коммуникации 5 осуществляет передачу обработанной подсистемой 3 информации во внешний мир 1. В этом случае внешний мир 1 выступает в роли приемника информации. Любое техническое устройство информационного характера необходимо рассматривать как подсистему информационной системы человека. Человеко-машинные информационные системы содержат внутреннюю модель, являющуюся результатом взаимодействия моделей человека-пользователя и технического средства ЭВМ. Следовательно, внутренняя модель, содержащаяся в памяти машины, не используется ею автономно, без воздействия пользователя. По этой причине нельзя говорить об электронно-вычислительной машине (ЭВМ) как самостоятельной самоорганизующейся системе. Программа и данные на некоторое время становятся информационной моделью реального мира, а ЭВМ вместе с пользователем образует на это время единую информационную систему.

Автономные информационные системы могут получать и перерабатывать информацию, принимать решения без непосредственного взаимодействия с человеком. Сюда относятся информационные системы от простейших регуляторов до систем искусственного интеллекта.

## 1.2. Сигнал

Материальным носителем информации является сигнал. Его следует рассматривать как средство для передачи информации в пространстве и во времени, как некоторый материальный носитель информации.

Различают сигналы статические и динамические. Статические, в основном, предназначены для передачи информации во времени, то есть для хранения информации с последующим ее использованием. Динамические служат для передачи в пространстве, например, механические и электромагнитные волны.

Всякий сигнал неразрывно связан с определенной системой – системой связи или системой передачи информации. Такая система показана на рис. 1.2.

Она состоит из источника информации 1, передатчика 2, канала связи 3, приемника 5, адресата 6 и источника помех 4.

Множество возможных сообщений бывают различных типов. Например, конечные множества символов в системе передачи данных, бесконечные множества, элементами которых являются значения некоторой физической величины. Конечное множество относится к дискретным, а бесконечные множества – к непрерывным сообщениям.

Передатчик преобразует сообщение в сигнал. В передатчике из возможных сообщений источника информации на входе

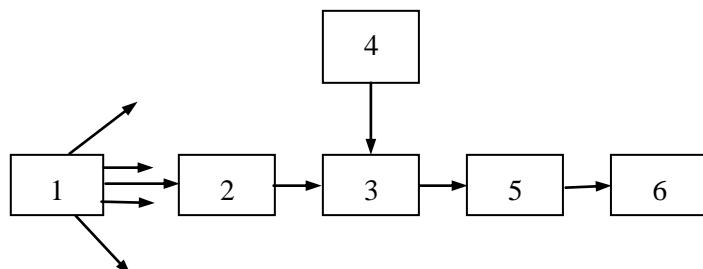


Рис. 1.2. Схема системы передачи информации: 1-источник информации; 2- передатчик; 3- канал связи; 4- источник помех (возмущения); 5- приемник; 6- адресат

его преобразуется в одно из возможных значений сигнала, на выходе – по строго установленному правилу. Например, в микрофоне каждому сообщению в виде акустического давления соответствует определенное значение электрического тока, т.е. определенный сигнал.

Процесс преобразования сообщения в сигнал может называться модуляцией, кодированием, манипуляцией в зависимости от типов сообщений и сигналов. Для передачи сигналов применяются каналы связи. В качестве каналов связи может быть использована двухпроводная электрическая линия, акустический канал, эфир для электромагнитных волн, оптическое стекловолокно, т.е. прозрачная для данного вида сигнала среда. По одному и тому же каналу связи, например, воздушному, могут распространяться как акустические, так и электромагнитные волны различных частот.

В любом канале связи, кроме сигнала передатчика (источника сигнала, генератора сигнала), действуют и другие, родственные по своей природе сигналы. Эти посторонние сигналы накладываются на полезный сигнал и искажают (засоряют) его. Поэтому на выходе канала связи сигнал отличается от входного, то есть от сигнала передатчика. На рис.1.2 такая накладка осуществляется блоком 4. Приемник 5 восстанавливает сигнал переданного через канал связи 3 передатчика 2. Восстановление этого сигнала в приемнике 5 происходит по обратному правилу, то есть по правилу преобразования сигнала в сообщение. Такое преобразование называется демодуляцией, декодированием или просто детектированием. Адресат 6 в системах передача - прием — это либо непосредственно человек, либо технические средства, связанные с человеком. В биологической системе адресатом является орган.

Приближенное представление физического процесса, используемого для передачи информации, называется моделью сигнала.

Сигналы друг от друга отличаются по параметрам. Параметры сигнала можно разделить на: структурные, идентифицирующие и информативные.

Структурные параметры определяют число степеней свободы сигнала.

Идентифицирующие параметры служат для выделения полезного сигнала среди других сигналов, не предназначенных для данного адресата. Информативные параметры - для кодирования передаваемой информации.

Сигналы могут быть описаны математически, например, в виде:

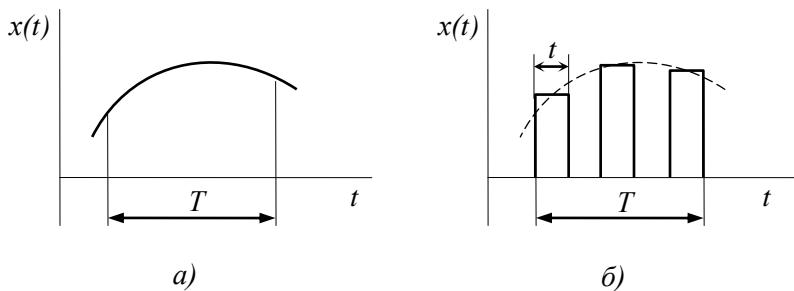
$$x = X \sin(2\pi ft + \varphi),$$

где  $X$  - амплитуда сигнала;  $f$  - частота;  $\varphi$  - начальная фаза.

Возможные сообщения из множества сообщений преобразуются в передатчике в различные значения  $X$ , то есть в различные значения амплитуды. Тогда величина  $X$  является информативным параметром сигнала. В качестве информативных параметров могут быть также  $f, \varphi$  в зависимости от вида модуляции. По частоте сигнал  $x$  можно выделить среди других сигналов того же класса, поэтому обычно при амплитудной  $X$  модуляции параметры  $f$  относятся к идентифицирующим параметрам.

Параметры  $t$  относятся к структурным параметрам сигнала. По этому параметру определяют число степеней свободы.

В зависимости от вида модуляции частота  $t$  может быть и информативным, и идентифицирующим параметром. Сигналы также как и сообщения по своим информативным параметрам разделяются на дискретные и непрерывные. Если информативный параметр сигнала четный или конечный, то сигнал будет дискретным по этому параметру. Если информативный параметр принимает множество значений, то сигнал непрерывный по данному параметру. Время, в течение которого существует

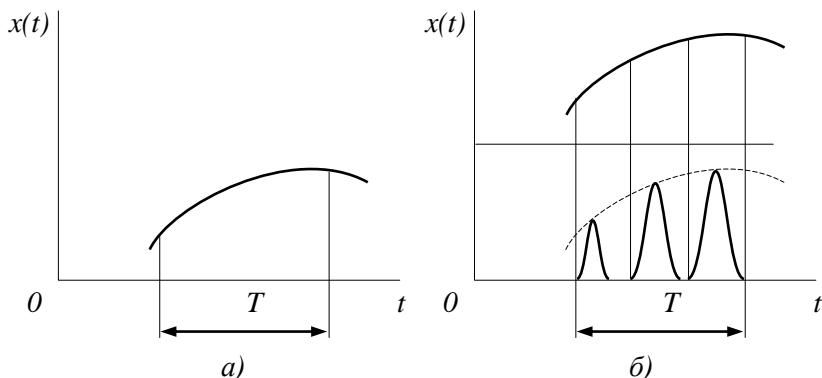


**Рис.1.3. Виды сигналов: а) непрерывный; б) импульсивный**

сигнал в элементе автоматической системы, обозначим  $T$  – длительность сигнала. Сигнал непрерывный, если в течение времени  $T$  его значение представляет непрерывную функцию  $x(t)$  (рис.1.3, а).

Сигнал будет импульсивным, если время существования сигнала  $t$  меньше длительности непрерывного сигнала  $T$  (рис. 1.3, б).

Форму импульса определяет функция  $x(t)$ . Последовательность импульсов называется дискретным сигналом. Такая последовательность импульсов на выходе элемента появляется только при подаче на вход непрерывного сигнала (рис.1.4).



**Рис.1.4. Виды сигналов:** а) входной непрерывный;  
б) выходной дискретный

### 1.3. Единичная функция

Для описания сигнала  $x(t)$  надо указать момент включения

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \sin^2 \gamma t & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\gamma} \\ 0 & \text{при } t > \frac{\pi}{\gamma} \end{cases}$$

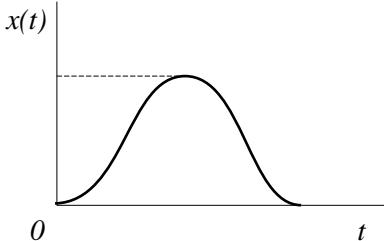


Рис.1.5. Вид сигнала  
( $\sin^2 \gamma t$  импульс)

и выключения, то есть интервал от  $\tau$  до  $\tau+T$ , и форму сигнала в этом интервале  $T$ .

Например, пусть  $\tau=0$  и  $\tau+T=\pi/\gamma$ , а форма определяется функцией, например,  $\sin^2 \gamma t$ , тогда сигнал может быть описан следующим образом:

$$x(t) = \sin^2 \gamma t \quad (0 \leq t \leq \pi/\gamma).$$

Этот сигнал называется  $\sin^2$  импульсом (рис.1.5).

Это показывает, что сигнал  $\sin^2 \gamma t$  действует лишь в интервале времени  $0 - \pi/\gamma$ . Но более удобна запись сигнала с помощью единичной функции Хевисайда  $I(t)$  (рис.1.6).

Эта функция равна 0 при  $t < 0$  и равна 1 при  $t > 0$ . Тогда можно записать:

$$I(t-\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \tau \\ 1 & \text{при } t > \tau \end{cases}$$

Полученная единичная функция называется запазды-

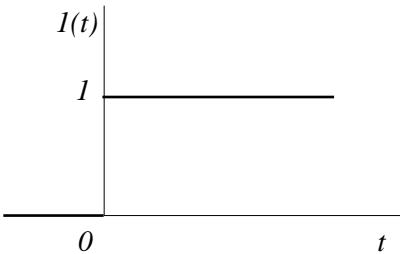


Рис.1.6. Единичная  
функция

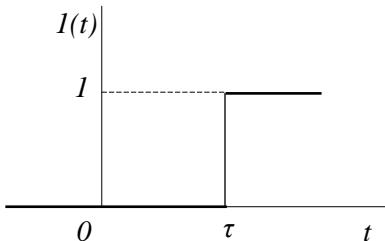
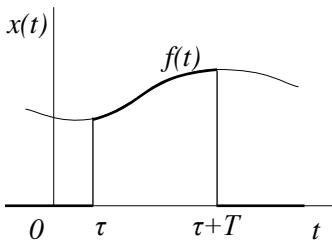


Рис.1.7. Запаздывающая  
единичная функция



**Рис.1.8. Запись непрерывного сигнала с помощью единичной функции**

вающей (рис. 1.7). Разность функций  $1(t)$  и  $1(t-\tau)$  равна единице в интервале  $0-\tau$  и 0 — вне этого интервала.

Поэтому умножение функции, определяющей сигнал, на эту разность  $[1(t)-1(t-\tau)]$  дает выражение сигнала в интервале  $(0-\tau)$ .

Тогда с помощью единичной функции сигнал можно описать следующим образом:

$$x(t) = \sin^2 \gamma [1(t) - 1(t-\tau)].$$

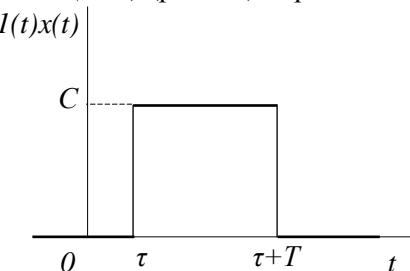
Такая форма удобна для математического исследования.

Всякий непрерывный сигнал, действующий в интервале от  $\tau$  до  $\tau+T$ , с помощью единичной функции можно записать:

$$x(t) = f(t)[1(t-\tau) - 1(t-\tau-T)],$$

где  $f(t)$ - форма сигнала называется описывающей и ее можно считать заданной и дифференцируемой достаточное число раз при всех значениях  $t$  (рис. 1.8).

Когда  $f(x)=C$ , получим прямоугольный импульс в интервале  $\tau-(\tau+T)$  (рис.1.9). При  $T=\infty$  сигнал получается в виде скачка.

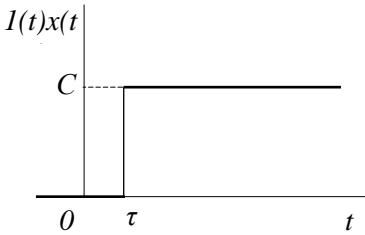


**Рис.1.9. Запись постоянного сигнала  $C$  с помощью единичной функции**

При  $C=1$  — это единичный скачок, размерность величины  $C$  (рис 1.10). На самом деле на практике нет таких скачков, если можно считать скачком, когда время возрастания сигнала мало по сравнению с интервалом времени, существенным для исследования системы.

$$x(t) = \sin^2 \gamma [l(t) - l(t - \frac{\pi}{2\gamma}) + l(t - \frac{\pi}{2\gamma})].$$

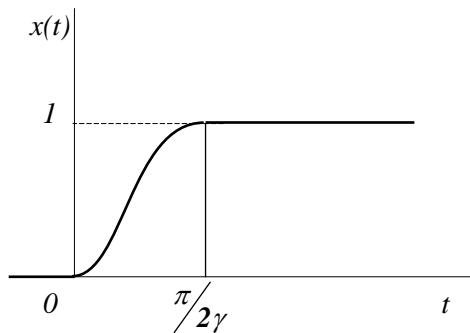
Вид сигнала представлен на рис. 1.11.



**Рис.1.10. Запись сигнала  
при  $T=\infty$**

При малой частоте  $\gamma$  время  $\pi/2\gamma$  может оказаться очень малым, тогда из последующего уравнения находим равенство:  $x(t)=l(t)$ , то есть единичная функция становится идеализацией сигнала. Подобным образом любой сигнал, возрастающий от 0 до  $C$ , в малом интервале  $\tau$ ,  $\tau+T$  и сохраняющий значение  $C$ , приближенно можно заменить скачком и записать в виде:

$$x(t)=C \cdot l(t-\tau).$$



**Рис.1.11. Вид реального скачка  
сигнала**

## 1.4. Элементы теории ошибок

Все измерения можно производить только с определенной степенью точности.

Точность измерения определяется той наименьшей частью единицы меры, до которой с уверенностью можно провести измерения. Для исключения случайных ошибок, возможных при каждом измерении, измерения следует производить несколько раз и брать среднее арифметическое всех результатов. Допустим, величина  $A$  измерялась  $N$  раз. Пусть результаты измерений будут равны  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ . Тогда среднее значение определяется по формуле:

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{N} = \frac{\sum A_i}{N}.$$

Пусть отклонение очередного измерения будет  $A_i$ , среднее значение результатов измерений  $A_{cp}$ . Тогда  $|A_{cp} - A_i| = \Delta A_i$  называется абсолютной ошибкой  $i$ -го измерения.

Средняя абсолютная ошибка измерения определяется аналогично нахождению среднего значения измерения и вычисляется по формуле:

$$\Delta A = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \dots + \Delta A_n}{N} = \frac{\sum \Delta A_i}{N}.$$

Считается, что  $A_{cp} - \Delta A < A < A_{cp} + \Delta A$ . Средняя относительная ошибка измерения определяется как отношение средней абсолютной ошибки к среднему значению и выражается в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_{cp}} \cdot 100\%.$$

Интересующий результат измерения редко может быть получен измерением только одной величины. Обычно измеряют несколько величин и результат вычисляют по соответствующей формуле.

## **1.5. Вычисление погрешностей**

Если  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$  малые погрешности величин  $x, y, z, \dots$ , то соответствующие малые погрешности от функции  $f(x, y, z, \dots)$  вычисляются из

$$\Delta f \approx \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z + \dots$$

Все погрешности рассматриваются как абсолютные значения. Отношение  $\Delta f/f$  называется относительной погрешностью функции  $f$ . Выражение  $\frac{\Delta f}{f} \cdot 100\%$  - погрешность в процентах.

## **1.6. Погрешности измерительных устройств**

Под погрешностью измерительного устройства понимают разность между результатом измерений  $x$  и ее действительным значением  $x_0$ :

$$\Delta x = x - x_0.$$

Все погрешности измерительных устройств зависят от выбранного метода измерения, принципа действия прибора и конструктивных недостатков.

Систематические погрешности являются или постоянными по величине и знаку, или медленно изменяющимися во времени функциями. Их определяют путем многократных измерений одной и той же величины при постоянных условиях, при возникновении зазоров в деталях измерительного устройства, колебаниях температуры окружающей среды или прибора, давления, влиянии помех и т.д. Появляются случайные ошибки. Они обычно являются неустранимыми.

Вследствие влияния погрешностей за измеренное значение принимают среднее арифметическое значение  $\bar{x}$  из  $N$  измерений:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}.$$

Случайную погрешность принято оценивать средним квадратическим значением:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}.$$

Если случайная погрешность подчиняется нормальному закону распределения, то предельная погрешность

$$\Delta = \pm 3\delta.$$

Между средним квадратическим отклонением  $\bar{\delta}$  погрешности единичного измерения и средним квадратическим значением  $\delta$  погрешности среднего арифметического имеется следующая зависимость:

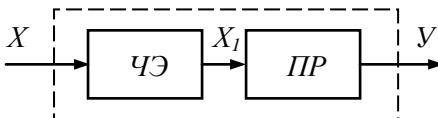
$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\sqrt{n}},$$

где  $n$  — число замеров, для которых подсчитывается среднее арифметическое значение.

## 1.7. Элементы восприятия информации

В системах автоматического управления или регулирования для получения необходимой информации о процессах, протекающих на объекте, используют различные устройства. Они содержат чувствительные элементы, реагирующие на перемещение, угловую скорость, давление, температуру, частоту, расход жидкости, электрический ток, напряжение и т. д. Как правило, чувствительный элемент не только реагирует на отклонение регулируемой величины от установленного значения, но и преобразует ее к виду, удобному для дальнейшего использования в системе информации.

Чувствительный элемент, в котором одновременно с измерением, физическая величина преобразуется в другую форму, более удобную для ее передачи, называют датчиком. Датчик можно представить в виде чувствительного элемента и преобразователя (рис.1.12).



**Рис.1.12. Схема датчика**

Чувствительный элемент *ЧЭ* преобразует контролируемую величину *X* в такой вид сигнала *X<sub>1</sub>*, который удобен для измерения. Преобразователь *ПР* преобразует неэлектрический сигнал *X<sub>1</sub>* в электрический *Y*. Например, давление *X* в электроконтактном манометре сначала преобразуется с помощью чувствительного элемента в механическое перемещение стрелки *X<sub>1</sub>*, а затем уже в преобразователе – в изменение сопротивления *Y*. На вход датчика могут поступать как электрические, так и неэлектрические сигналы. С выхода датчика обычно получают электрические сигналы. Это вызвано тем, что электрический сигнал проще усиливать и передавать на большие расстояния. К основным характеристикам датчиков относятся: статическая характеристика; порог чувствительности; динамическая чувствительность; инерционность; погрешность; мощность; момент; выходная мощность и сопротивление.

Инерционность датчика характеризует отставание изменения выходной величины *Y* от изменений входной величины *X*. Она является нежелательной, так как приводит к погрешностям и недостаткам при измерениях. Динамическая чувствительность датчика *S* или динамический коэффициент преобразования *K<sub>дин</sub>* показывает, во сколько раз приращение выходной величины больше приращения входной величины *ΔX*:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \approx \frac{dY}{dX} .$$

Порог чувствительности – это наименьшая по абсолютному значению величина входного сигнала, которая вызывает изменение выходного сигнала.

В таблице 1 приведена более универсальная классификация преобразователей по их физическим свойствам преобразования чувствительного элемента одних физических величин в другие. Например, мембрана, имеющая некоторую площадь со-

прикосновения с контролируемой средой, имеющей некоторое давление, отличное от окружающей среды, воспринимает действие в виде силы. Из-за наличия упругих свойств мембранны, сила преобразуется в механическое перемещение ее центра. Тензорезистор, оказавшись в поле деформации мембранны, деформируется, т.е. фиксирует состояние тела (мембранны), с которым он находится в контакте, и является чувствительным элементом. Изменение внутренней структуры проводника приводит к изменению удельного сопротивления – преобразует деформацию в изменение удельного сопротивления.

По таблице видно, что одну и ту же физическую величину можно преобразовать различными по чувствительному элементу преобразователями, например, положение объекта можно фиксировать такими преобразователями как кулачковыми, гироскопами, контактными, сопротивления как активными, так и реактивными, генераторными и т.д. Но и одними и теми же преобразователями без труда можно преобразовать различные физические величины в другой вид сигнала. Например, пьезоэлектрический преобразователь преобразует в электрическое напряжение деформацию, ускорение, силу, давление, шум и т.д.

Применение того или иного преобразователя для преобразования одной и той же физической величины или одного преобразователя для измерения различных физических величин зависит от безопасности применения, стоимости, точности и т.д. Поэтому применение конкретного преобразователя или нескольких преобразователей для измерения одной физической величины зависит от цели и задачи автоматической системы управления объектами управления.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные параметры сигналов.
2. Каким образом получают сигналы через единичную функцию?
3. Назовите виды погрешностей.
4. Что называется датчиком?

## ПРЕОБРАЗАТЕЛИ ИХ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

### Таблица 1

		Механические величины			Электрические величины	
		Преобразователи			Механические величины	
		Кулаковые			Положение	
		Тахометры			Ориентация	
	С механическим выходным сигналом	Гирокол. мех.	+	+	Деформация	
		Динамометры	+	+	Скорость	
		Пневматичек.	+	+	Ускорение	
		Гидравлические	+	+	Сила	
		Контактные мех.	+	+	Момент	
		Герконы	+	+	Давление	
		Герконы ртутн.	+	+	Уровень	
		Проволочные	+	+	Плотность	
		Пленочные	+	+	Объем	
		Тензорезисторы	+	+	Масса	
		Полупроводн.	+	+	Влажность	
	Активного сопротивления	Магнитоскопр.	+	+	Шум	
		Фотоскопр.	+	+	Колебание	
		Угольные	+	+	Расход	
		Индукт. с зазор.	+	+	Состав вещ.	
	Реактивного сопротивл.	Магнитостриц.	+	+	Эл. поле	
		Емкостные	+	+	Магн. поле	
			+	+	Эл. напряж.	
			+	+	Эл. ток	
			+	+	Эл. мощн.	
			+	+	Эл. работа	
			+	+	Фазы колеб.	
			+	+	Частота	
			+	+	Время	
			+	+	Температура	
			+	+	Свет	

Таблица 1 (продолжение)

Таблица 1 (окончание)

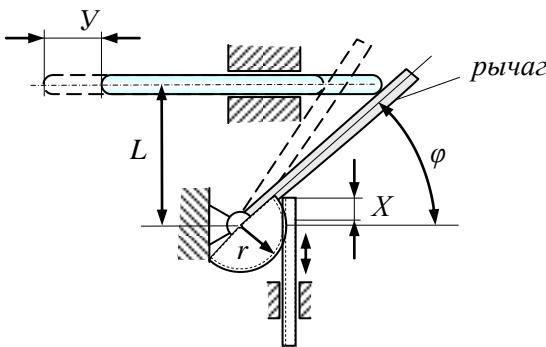
		Тангенциальные	+
	Счетчики вещества	Ацидальные	+
		Объемные	+
		Индукционные	+
		Парциальные	+
	Гигрометры	Психрометры	+
		Волосяные	+
		С термост. плен.	+
		С кор. зам. обм	+
	Счетчики времени	Моторные	+
		Механические	+
		Пневматические	+
		Электронные	+
		Жидкостные	+
	Термометры	Биметаллические	+
		Дилатометрич.	+
		Пирометр опт.	+
		Электрометр	+
		Баллист. гальвак.	+
	Преобразов. величин	Микроамперметр	+
		Частотомер	+
		Фазометр	+
		Ватметры	+
		Счетчики	+
		Осциллографы	+

## ГЛАВА 2. Простейшие механические преобразователи

### 2.1. Рычажный преобразователь

К простейшим механическим преобразователям можно отнести различные рычаги, кулачки, скребки и т.д. Рычаги не преобразуют перемещение в другой вид сигнала, а преобразуют такое же механическое перемещение или усилие, но по заранее выбранному закону.

На рис.2.1 показан простейший преобразователь одного механического перемещения в другое механическое перемещение. Зависимость выходной величины  $Y$  от входной -  $X$  в зависимости от положения преобразователя – рычага можно записать в виде:



**Рис.2.1. Рычажный преобразователь**

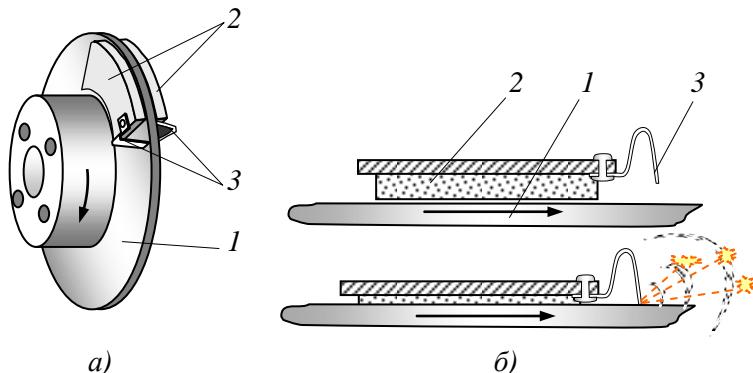
$Y = L \cdot C \operatorname{tg} \left( \frac{X}{r} \right)$ .

### 2.2. Скребковый преобразователь

Скребковый преобразователь представляет собой металлическую пластину, изогнутую под определенной конфигурацией. Преобразователь предназначен для преобразования положения объекта (например, тормозной накладки автомобиля) в звуковой сигнал.

В процессе эксплуатации одними из самых изнашивающихся деталей транспортных средств являются тормозные накладки. Тормоза некоторых автомобилей оснащены визуальными преобразователями. На приборной доске панели автомобиля загорается предупредительный сигнал, когда накладка полностью изнашивается.

ется. Такая система требует того, чтобы каждая колодка была оснащена электрическим преобразователем, связанным с сигнальной лампочкой или иным информационным устройством с помощью электрического провода, поэтому она является достаточно дорогостоящей. Некоторые автомобили оснащены тактильными преобразователями, где выступ на диске соприкасается с поверхностью колодки, когда накладка изношена. Из-за этого педаль тормоза во время торможения начинает вибрировать.



**Рис.2.2. Схема работы скребкового преобразователя: а) узел дискового тормоза с преобразователем, б) положение преобразователя до и после износа тормозной накладки; 1- тормозной диск; 2- тормозная накладка; 3- скребковый преобразователь**

Простейшим в эксплуатации и обслуживании является скребковый преобразователь. На рис.2.2 приведена схема работы преобразователя. Он представляет собой скребок (лапку) 3, которая крепится к сбегающему концу внешней колодки 2. Когда накладка колодки 2 изнашивается до такой степени, что ее надо заменять, этот преобразователь трется о внешний край тормозного диска 1 и производит тем самым громкий визг, сигнализируя об уменьшении толщины накладки.

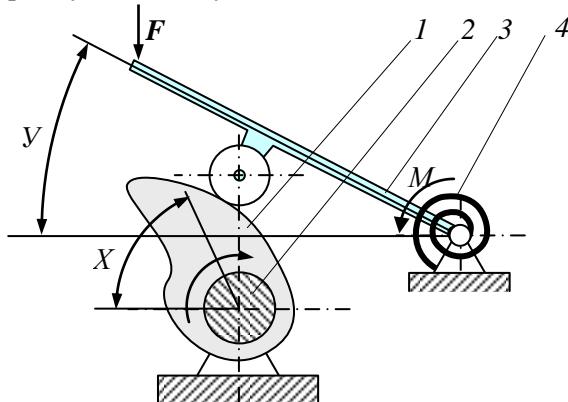
### 2.3. Кулачковый преобразователь

Кулачки имеют различные профили и устанавливаются на

валу. При вращении вала, благодаря силовому замыканию кулачка и подвижной части механизма, траектория последнего соответствует профилю кулачка. Одна из схем кулачкового преобразователя приведена на рис.2.3. Для кулачкового механизма входным сигналом  $X$  является угол поворота вала кулачка. Выходным сигналом  $Y$  может быть или прямолинейное перемещение штанги (подвижного звена 3), или угловое отклонение поворотного рычага.

Задавая соответствующий профиль кулачку, можно легко получить любой закон движения взаимодействующего звена. В этом существенная особенность кулачкового преобразователя. Для обеспечения непрерывного контакта звеньев в кулачках применяют силовое или геометрическое замыкание. При силовом замыкании звенья прижимаются друг к другу пружиной, силой тяжести груза, давлением жидкости, силой инерции и т.д.

К преимуществам кулачковых датчиков относятся: простота



**Рис. 2.3. Схема кулачкового преобразователя: 1- кулачок; 2- ось кулачка; 3- выходное звено – подвижная часть; 4- пружина замыкания**

конструкции, неквалифицированный уход, надежность.

К недостаткам относятся наличие труящихся поверхностей, нарушение зазоров из-за трения, необходимость в регулярной смазке.

## 2.4. Центробежный тахометр

Преобразователь угловой скорости вращения вала – центробежный тахометр, выполненный по схеме Уатта, является одним из наиболее распространенных устройств для измерения угловых скоростей (рис.2.4). Он преобразует частоту вращения в линейное перемещение подвижной ползун-втулки 2, сжимая пружину 3 (угловое отклонение грузов 1).

Вращение приводного вала 4 приводит во вращение грузы, установленные на этом же валу при помощи стержней 5. На грузы 1 действуют силы тяжести  $G_1$ , при наличии угловой скорости  $\omega$  центробежные силы инерции  $\Phi = m\omega^2 R$ , и реакция стержня 5, где  $m$ - масса грузов,  $\omega$ - угловая скорость приводного вала

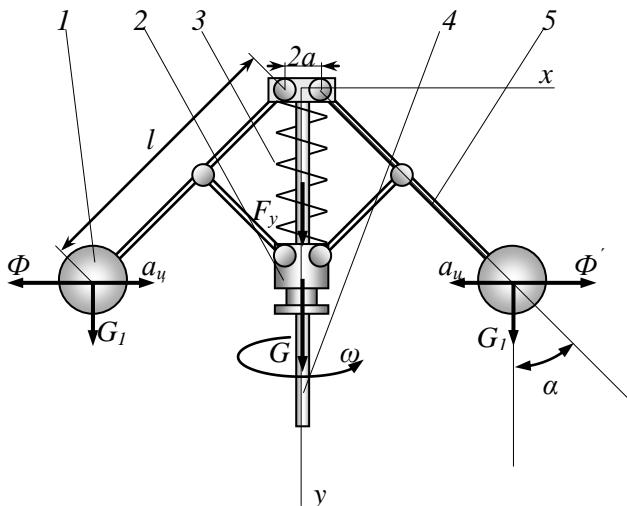


Рис.2.4. Центробежный регулятор: 1- грузы; 2- ползун-втулка; 3- пружина; 4- вал преобразователя; 5- стержень

Муфта отжимается вниз пружиной 3, закрепленной верхним концом на оси преобразователя. При отсутствии

отклонения стержня 5 пружина не деформирована; коэффициент жесткости пружины равен  $c$ . Длина каждого стержня равна  $l$ ; оси подвеса стержней отстоят от оси регулятора на расстоянии  $a$ .

При равномерном вращении преобразователя силы инерции грузов направлены противоположно центростремительным ускорениям  $a_c$  грузов 1. Силы инерции, действующие на грузы 1, определяются по формуле:

$$\Phi = mr\omega^2 = \frac{G}{g}(a + l \sin \alpha)\omega^2.$$

где  $r=a+l \sin \alpha$  — расстояние от центров грузов до оси вращения преобразователя.

Рассмотрим возможное перемещение грузов, при котором происходит изменение угла  $\alpha$  между осью вращения преобразователя и стержнем 5. Общее уравнение динамики будет иметь вид:

$$G_1 \delta y_A + G_1 \delta y_{A1} + (G + F_y) \delta y_B - \Phi \delta x_A + \Phi' \delta x_{A1} = 0.$$

Определим координаты точек приложения сил в выбранной системе координат. Проекции возможных перемещений этих точек найдем, дифференцируя координаты по переменной  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} y_A &= y_{A1} = l \cos \alpha; & \delta y_A &= \delta y_{A1} = -l \sin \alpha \delta \alpha; \\ x_A &= -(a + l \sin \alpha); & \delta x_A &= -l \cos \alpha \delta \alpha; \\ x_{A1} &= a + l \sin \alpha; & \delta x_{A1} &= l \cos \alpha \delta \alpha; \\ y_B &= 2l \cos \alpha; & \delta y_B &= -2l \sin \alpha \delta \alpha. \end{aligned}$$

Подставим эти значения в общее уравнение динамики:

$$-2G_1 l \sin \alpha \delta \alpha - (G + F_y) 2l \sin \alpha \delta \alpha + 2\Phi l \cos \alpha \delta \alpha = 0,$$

или

$$\Phi \cos \alpha = [G_1 + G + 2cl(1 - \cos \alpha)] \sin \alpha.$$

Приравняем значение силы инерции  $\Phi$  к полученному для нее выражению:

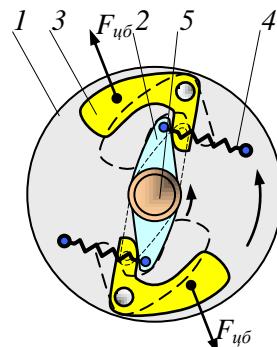
$$\Phi = \frac{G}{g} (a + l \sin \alpha) \omega^2 = [G_1 G + 2cl(1 - \cos \alpha)] \operatorname{tg} \alpha,$$

отсюда найдем функцию  $\omega(\alpha)$

$$\omega = \sqrt{\frac{[G_1 + G + 2cl(1 - \cos \alpha)] \operatorname{tg} \alpha}{G_1 (a + l \sin \alpha)}}.$$

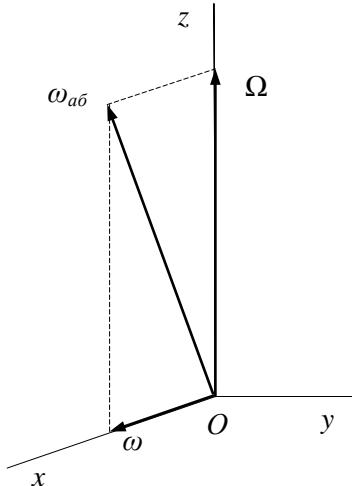
Эти преобразователи относятся к дифференцирующим звеньям систем автоматического регулирования автомобилей и тракторов, часто как регуляторы прямого действия.

Разновидностью центробежного преобразователя является схема центробежного преобразователя момента искрообразования автомобилей ВАЗ-2108 и ВАЗ-1113, приведенная на рис. 2.5. Он задает момент искрообразования в зависимости от начальной его установки, числа оборотов коленчатого вала. Входным звеном является ведущий диск 1, жестко связанный с валом 5. При увеличении частоты вращения диска 1 с валом 5, под действием центробежных сил  $F_{цб}$  грузики 3 поворачиваются вокруг своих осей по часовой стрелке и другими концами в виде кулачка создают врачающий момент, приложенный к ведомому элементу 2. Вращающий момент отклоняет элемент 2 в сторону вращения ведущего диска. Этим обеспечивается опережение угла искрообразования при повышении частоты вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.



**Рис.2.5 Центробежный преобразователь момента искрообразования: 1- ведущий диск; 2- ведомый элемент; 3- грузик; 4- пружина; 5- ведущий вал**

## 2.5. Гироскоп



**Рис.2.6. Векторная диаграмма скоростей гироскопа**

(рис.2.6). Это позволяет построить приближенную теорию гироскопа. Тогда кинетический момент

$$K_0 = J_z \Omega,$$

где  $K_0$ - кинетический момент ротора относительно неподвижной точки  $O$ ;  $J_z$  - момент инерции гироскопа относительно оси собственного вращения  $z$ .

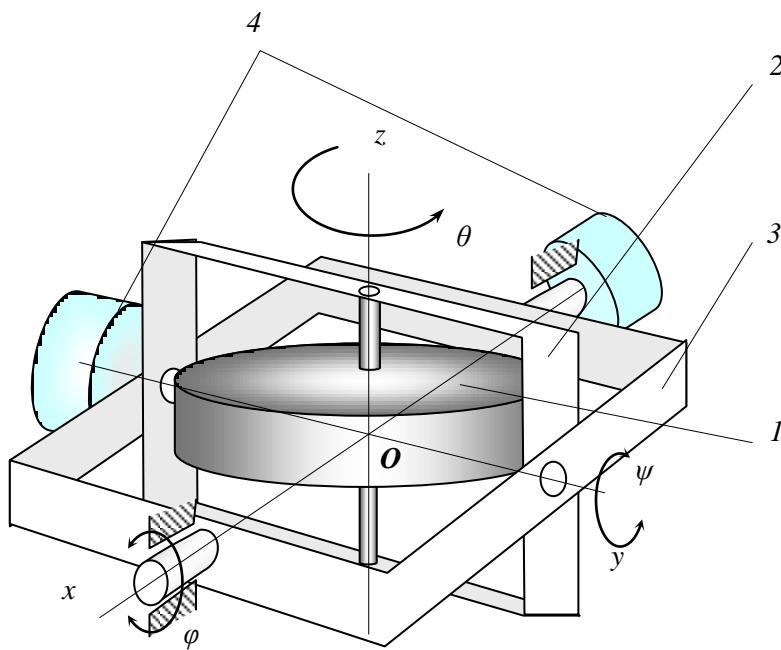
Пусть центр тяжести гироскопа совпадает с неподвижной точкой  $O$ , а ось собственного вращения может совершать любой поворот вокруг этого центра (рис.2.7). Такой гироскоп называется свободным. Известно, что изменение кинетического момента равно моменту внешних сил:

$$\frac{dK_0}{dt} = M(F^e).$$

Если пренебречь трением в осях подвеса, внешний момент

Гироскоп – это быстро вращающийся ротор с одной неподвижной точкой. Как известно, твердое тело с одной неподвижной точкой совершает сферическое движение. При сферическом движении за координаты движения принимают углы Эйлера: угол собственного вращения  $\varphi$ ; угол прецессии  $\psi$  и угол нутации  $\theta$ .

У гироскопов, применяемых в технике, угловая скорость собственного вращения  $\frac{d\varphi}{dt} = \Omega$  намного больше суммарной угловой скорости прецессии  $\dot{\phi}$  и нутации  $\dot{\theta}$ , отсюда можно сделать вывод, что  $\Omega = \dot{\varphi} \approx \omega_{ab}$



**Рис.2.7.** Гироскоп с тремя степенями свободы: 1- ротор гироскопа; 2- внутренняя поворотная рама; 3- наружная поворотная рама; 4- преобразователи угла отклонения оси ротора относительно осей  $Ox$  и  $Oy$

$M(F^e) = 0$  и поэтому  $K_0 = \text{Const}$ , т.е. модуль и направление кинетического момента гироскопа постоянны. Так как вектор  $K_O$  и ось собственного вращения ротора гироскопа совпадают, то ось свободного гироскопа сохраняет неизменное направление в пространстве по отношению к инерциальной системе отсчета. Это одно из важных свойств гироскопа, используемое при конструировании гироскопических приборов.

Сохраняя неизменное направление в звездной системе отсчета, ось свободного гироскопа по отношению к Земле будет совершать вращение в сторону, противоположную направлению вращения Земли.

## 2.6. Вибрационный гиротрон

Этот прибор является гироскопическим устройством совершенно нового типа и даже не подходит под определение гироскопа, данное в начале. Основным его элементом является не вращающийся ротор, а соответствующим образом настроенный вибратор. Главным его назначением будет измерение угловой скорости тела, с которым он связан. Установив, например, его вертикально на самолете, в подводной лодке или в космическом корабле можно будет обнаружить вращение этого объекта вокруг вертикальной оси и определить величину и направление его угловой скорости. На рис. 2.7 схематически показаны основные части гиротрона: 1- катушки, поддерживающие собственные колебания стержней; 2- катушки, воспринимающие собственные колебания стержней; 3- стержень; 4- катушки, воспринимающие крутильные колебания вибратора; 7- пластина вибратора. Основным его элементом является U- образный вибратор, жестко укрепленный на платформе. Платформа 6 изображает какой-нибудь предмет, на котором установлен гиротрон. Основание вибратора работает на кручение и рассчитано таким образом, чтобы находиться в механическом резонансе со стержнями вибратора, т.е. собственная частота крутильных колебаний вибратора вокруг его оси совпадает с собственной частотой колебаний его стержней. Поэтому колебания стержней вызывают крутильные колебания вибратора с такой же частотой.

Гиротрон снабжен тремя группами магнитных катушек, как показано на рисунке. Первая группа 1, воспринимает собственные колебания стержней вибратора и преобразует их в электрические сигналы, поступающие на усилитель. Усиленные сигналы поступают на вторую группу катушек 2, которая поддерживает собственные колебания стержней. Третья группа катушек 4 воспринимает крутильные колебания вибратора и преобразует их в выходные сигналы напряжения. Колебания стержней 3 вибратора должны иметь одинаковую частоту и амплитуду и должны совершаться в одной и той же плоскости во взаимно противоположных направлениях; следовательно, они должны одновременно или приближаться друг к другу, или удаляться друг от друга. Вибратор и связанные с ним катушки заключены в герметичный кор-

пус.

Гиротрон работает следующим образом. Когда платформа 6 находится в покое, колебания вибратора совершаются в одной и той же плоскости. Но если платформа 6 поворачивается, то с той

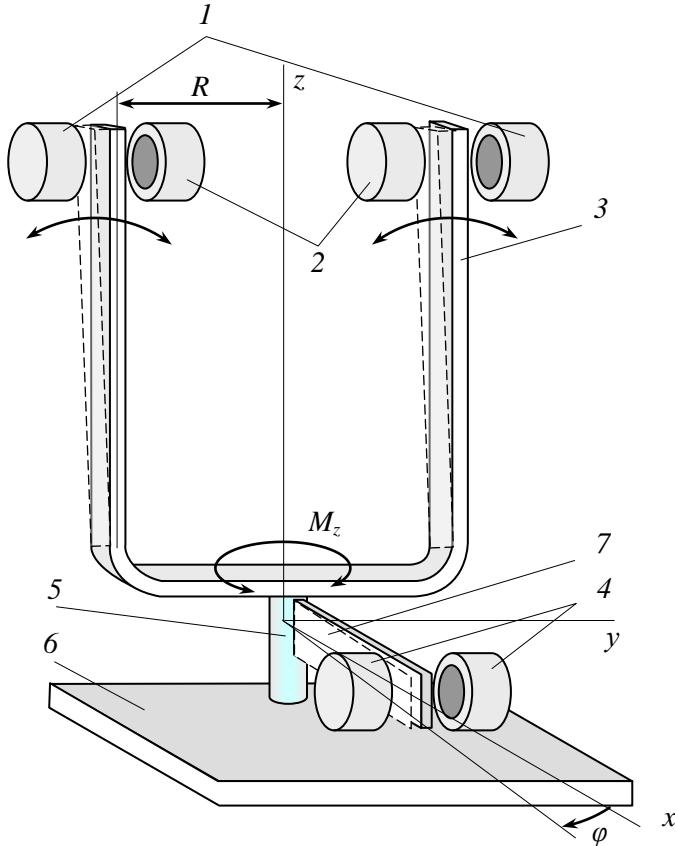


Рис. 2.7. Схема вибрационного гиротрона: 1- катушки собственного колебания; 2- катушки, воспринимающие собственные колебания; 3- колеблющиеся стержни; 4- катушки, воспринимающие крутильные колебания гиротрона; 5- упругое основание гиротрона; 6- платформа вибратора; 7- пластина вибратора

же скоростью поворачивается вокруг своей оси и вибратор. Если его стержни 3 при этом сближаются, то момент инерции вибратора относительно его оси уменьшается и, согласно закону сохранения кинетического момента, его угловая скорость увеличивается. Наоборот, если стержни 3 вибратора в это время расходятся, то его момент инерции увеличивается, а угловая скорость уменьшается.

Из равенства

$$K = I\omega$$

следует, что

$$\omega = \frac{K}{I}$$

и так как в данном случае из-за отсутствия внешнего момента кинетический момент вибратора относительно вертикальной оси постоянный  $K=const$ , то угловая скорость  $\omega$  изменяется обратно пропорционально моменту инерции  $I$  относительно вертикальной оси вибратора.

Момент инерции частицы  $m$  одного из стержней вибратора относительно оси равен:

$$I = mr^2 = m[R + \Delta R \sin \omega_1 t]^2 = mR^2 \left[ 1 + \frac{\Delta R}{R} \sin \omega_1 t \right]^2.$$

Учитывая, что  $(\Delta R / R)^2$  мало по сравнению с единицей, можно написать

$$I = mR^2 \left( 1 + 2 \frac{\Delta R}{R} \sin \omega_1 t \right).$$

Аналогичным образом выражается момент инерции всего прибора.

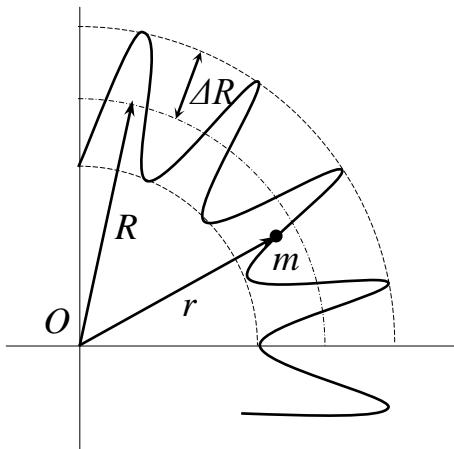
Результатом этого периодического увеличения и уменьшения угловой скорости вибратора относительно его оси является движение плоскости его стержней относительно платформы. Вследствие этого частицы вибратора периодически увеличивают свою скорость относительно платформы 6 и относительно неподвижного пространства. Это периодическое изменение скорости вызывает переменный момент, закручивающий упругое основание 5 вибратора, и заставляет связанную с вибратором пластинку 7

колебаться между установленными около нее катушками 4. Колебания этой пластинки создают электрические сигналы, поступающие во внешнюю цепь.

Когда платформа начинает вращаться в противоположном направлении, все силы также изменяют свое направление на противоположное. При этом фаза сигналов, поступающих от колеблющейся пластинки, изменяется на  $180^\circ$ , что обнаруживается специальным фазовым детектором, сравнивающим фазу этих сигналов, с фазой колебаний вибратора.

Вибратор подбирается так, чтобы он имел высокую частоту собственных колебаний (порядка 2000 колебаний в секунду). Это позволяет изолировать его от влияния внешних вибраций, так как крутильные колебания упругого стержня сопровождаются очень небольшой потерей энергии, то их следует нужным образом демпфировать.

Найдем угловую скорость колебаний пластинки вибратора относительно платформы. Для этого рассмотрим движение какой-либо частицы массы  $m$  на одном из стержней вибратора. Так как частота колебаний этих стержней велика по сравнению с угловой скоростью платформы, то траектория этой частицы будет иметь вид сильно сжатой синусоиды, как показано на рис. 2.8 (в увеличенном виде и с меньшей степенью сжатия). Пусть  $R$  обозначает среднее расстояние от вертикальной оси симметрии вибратора до каждого из стержней, а  $\Delta R$  - амплитуду колебаний этих стержней. Тогда расстояние частицы  $m$  от оси вибратора, будет меняться по закону



**Рис. 2.8. Схема движения частицы пластиинки гиротрона**

$$r = R + \Delta R \sin \omega_1 t, \quad (2.1)$$

где  $t$  - время,  $\omega_1$  - круговая частота колебаний вибратора. Отсюда получаем:

$$\frac{dr}{dt} = \Delta R \omega_1 \cos \omega_1 t. \quad (2.2)$$

Когда платформа вращается, частица  $m$  совершает сложное движение, и ее ускорение складывается из центростремительного и касательного ускорений. Они определяются по формулам:

$$a_n = \frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2$$

$$a_\tau = r \frac{d\omega}{dt} + 2\omega \frac{dr}{dt}$$

где  $\omega$  - угловая скорость платформы. При этом возникает сила инерции -  $ma_\tau$ , действующая в направлении, перпендикулярном к  $r$ . Момент этой силы относительно оси вибратора равен

$$M_z = -rma_\tau = -rm \left( r \frac{d\omega}{dt} + 2\omega \frac{dr}{dt} \right). \quad (2.3)$$

В общем случае угловая скорость  $\omega$  непостоянна, но можно принять

$$\omega = \Omega \cos \omega_0 t,$$

где  $\Omega$  - амплитуда, а  $\omega_0 / 2\pi$  - круговая частота главной гармоники функции  $\omega(t)$ . Тогда имеем:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\Omega_0 \sin \omega_0 t.$$

Подставив теперь (2.1) и (2.2) в уравнение (2.3) выражения для  $r$ ,  $dr/dt$ ,  $\omega$ ,  $d\omega/dt$  и произведя некоторые упрощения, получим:

$$M_z = -2mR(\Delta R)\Omega\omega_1 \cos \omega_1 t \cos \omega_0 t.$$

С учетом формулы  $\cos a \cdot \cos b = 1/2\cos(a+b) + 1/2\cos(a-b)$  получим:

$$M_z = -mR(\Delta R)\Omega\omega_1 [\cos(\omega_1 + \omega_0)t + \cos(\omega_1 - \omega_0)t].$$

Суммарный момент

$$M_z = -MR(\Delta R)\Omega\omega_1[\cos(\omega_1 + \omega_0)t + \cos(\omega_1 - \omega_0)t],$$

где  $M$  – масса всего вибратора.

Тогда дифференциальное уравнение колебаний пластиинки вибратора будет иметь вид:

$$I\ddot{\phi} + \lambda\dot{\phi} + c\varphi = -M_z,$$

где  $I$  - момент инерции вибратора относительно оси  $z$ ,  $\varphi$  - угол отклонения пластиинки относительно платформы,  $\lambda$  - коэффициент демпфирования,  $c$ - коэффициент жесткости упругого основания вибратора.

При отсутствии демпфирования частота колебаний пластиинки равна частоте колебаний вибратора.

Обозначив,  $\lambda = 0, M_z / I = f(t)$  имеем:

$$\ddot{\phi} = \frac{c}{I}\varphi = f(t)$$

Период собственных крутильных колебаний вибратора в этом случае равен  $2\pi/\sqrt{c/l}$ , и так как при  $\lambda = 0$  он должен совпадать с периодом собственных колебаний стержней вибратора, который равен  $2\pi/\omega_1$ , то  $\sqrt{c/l} = \omega$  т.е.  $\omega^2 = c/l$ .

К числу преимуществ вибрационного гиротрона относятся отсутствие подшипников и других истирающихся частей, а также небольшой размер и большой срок службы.

### Контрольные вопросы

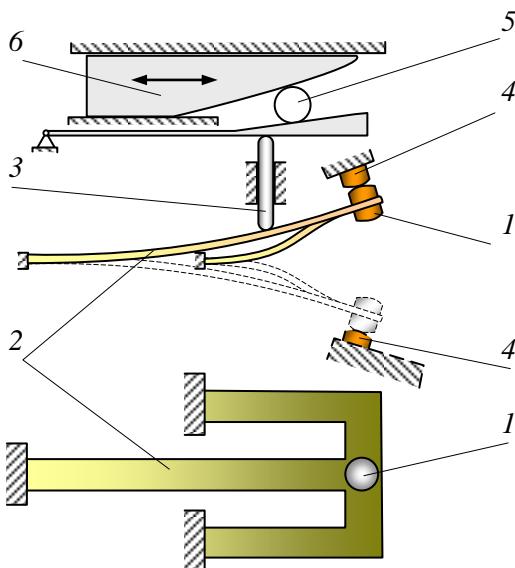
1. Можно ли отнести кулачки, скребки и центробежный тахометр к датчикам?
2. Что является входной величиной центробежного тахометра?
3. Что является входной и выходной величинами скребкового преобразователя и гиротрона?

## ГЛАВА 3. Электроконтактные преобразователи

### 3.1. Контактные преобразователи

Электрическим контактом называется соединение или размыкание двух проводников, позволяющее проводить или прекращать ток между ними или восстанавливать. Соприкасающиеся проводники называются контактами или контакт-деталями.

Контактные преобразователи являются дискретными. При достижении определенного значения контролируемой величины они размыкают или замыкают контакты электрических цепей. Существует два вида преобразователей: предельные – для контроля предельных размеров деталей и амплитудные – для контроля амплитуды отклонений формы, биения и других параметров. В зависимости от числа пар контактов контактные преобра-



**Рис. 3.1. Схема двухпозиционного микропереключателя:** 1- подвижный контакт; 2- перекидная пластинчатая пружина; 3- толкатель приводного элемента; 4 - неподвижные контакты; 5- вспомогательный ролик приводного элемента; 6- механический приводной элемент

зователи бывают одно-, двух- и многопредельные. По конструкции их делят на рычажные и безрычажные.

На базе контактных систем изготавливают микропереключатели. Высокие метрологические качества позволяют использовать их в качестве измерительных преобразователей. Любой микропереключатель (рис. 3.1) состоит из упругой перекидкой системы 2, на которой укреплен один или более подвижный контакт 1, неподвижных контактов 4 и приводного элемента 3. К приводному элементу прикладывается внешняя механическая сила.

Иногда между приводным элементом 3 и управляющей частью помещается вспомогательный элемент 5 для согласования движения управляющей части прибора с движением приводного элемента микропереключателя. Принцип работы на рис. 3.2. На этом рисунке упругая перекидная система представлена нерастяжимым элементом 1 с нулевой жесткостью на изгиб и элементом 2 с определенной жесткостью на сжатие. На рис 3.2, а подвижная часть микропереключателя находится в первом устойчивом положении, благодаря пружине 2. Подвижный контакт, установленный на подвижной части 1, прижат к первому неподвижному контакту 3 силой  $F_1$ .

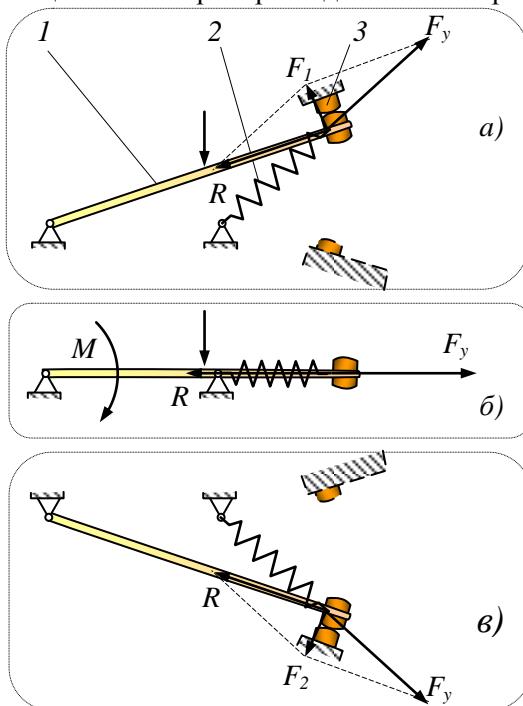
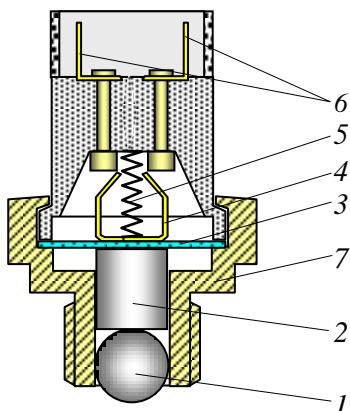


Рис. 3.2. Принцип работы двухпозиционного микропереключателя: 1-подвижная часть; 2- пружина; 3 - неподвижный контакт

Сила  $F_1$  определяется как сумма упругой силы  $F_y$  пружины и реакции  $R$  подвижной части 1. При приложении силы  $F_2$  к приводному элементу упругая система деформируется и в определенный момент ось элемента 1 пересечет ось элемента 2, при котором сумма  $F_1$  и  $R$  равна нулю. Возникает вращающий момент  $M$ , и упругая часть 1 из неустойчивого положения (рис. 3.2, б) переходит скачком во второе устойчивое положение (рис. 3.2, в). Скачок происходит быстро, так как упругая часть микропереключателя малоинерционна.

Основными характеристиками микропереключателей является нормальное значение тока и напряжения, характер нагрузки (омическая, индуктивная, ламповая, моторная), значение коммутируемой мощности, быстродействие, электрическая и механическая износостойчивость, степень защищенности от окружающей среды.



**Рис. 3.3. Контактный преобразователь заднего хода автомобиля:** 1- металлический шарик; 2- пластмассовый стержень; 3- упругая герметичная мембрана; 4- подвижный контакт; 5- пружина; 6- выводы контактов; 7- металлический корпус

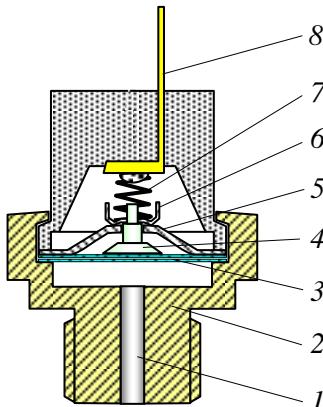
Контактные преобразователи на транспортных средствах применяются как преобразователи положения тех или иных механизмов управления, а также как элементы управления в качестве включающих устройств электрических исполнительных устройств. Часто они состоят из чувствительного элемента и преобразователя в виде контактной пары.

На рис. 3.3 представлена схема контактного преобразователя заднего хода автомобиля. Чувствительным элементом является шарик 1, воспринимающий изменения положения вилки переключения заднего хода. При перемещении шарика 1 внутрь корпуса 7, через промежуточный пластмассовый стержень 2, он через мембрану 3 перемещает подвижный

контакт 4 вверх. При этом контакт 6 замкнется, и сигнальная лампа включения заднего хода загорится. Пружина 5 предназначена для возврата перемычки 4 в разомкнутое состояние. Мембрана 3 предназначена для устранения утечки масла из коробки передач в контактный узел преобразователя.

К контактным преобразователям также относятся сигнализаторы минимального или максимального давления масла в системе смазки двигателя автомобиля. Такой преобразователь представлен на рис. 3.4.

Он состоит из двух узлов: чувствительного и преобразователя в виде контакта. Работает следующим образом. Давление системы смазки через отверстие 1 в корпусе 2 воздействует на упругую пластмассовую мембранны 3. Мембрана одновременно изолирует полость над мембраной от контролируемой среды. При деформации мембрана приподнимает подвижный контакт 6 вместе с диэлектрическим промежуточным грибкообразным стержнем 4. Ограничительная фигурная шайба 5 ограничивает перемещение стержня 4 вверх, предохраняя при этом выход из строя мембранны 3. Перемещение подвижного контакта 6 размыкает цепь: корпус 2; ограничительная фигурная шайба 5; подвижный контакт 6; пружина 7 и вывод 8. Размыкание контакта разрывает цепь контрольной лампы давления масла в системе смазки двигателя внутреннего сгорания. Отключение контрольной лампы информирует о достаточности давления в системе смазки.

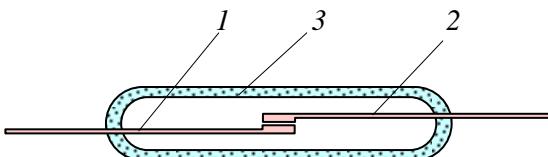


**Рис. 3.4. Контактный преобразователь минимального давления ДВС автомобиля:** 1- канал; 2- металлический корпус; 3- упругая герметичная мембрана; 4- диэлектрический толкатель; 5- фигурная ограничительная металлическая шайба; 6- подвижный контакт; 7- пружина; 8- вывод подвижного контакта

### 3.2. Герконы

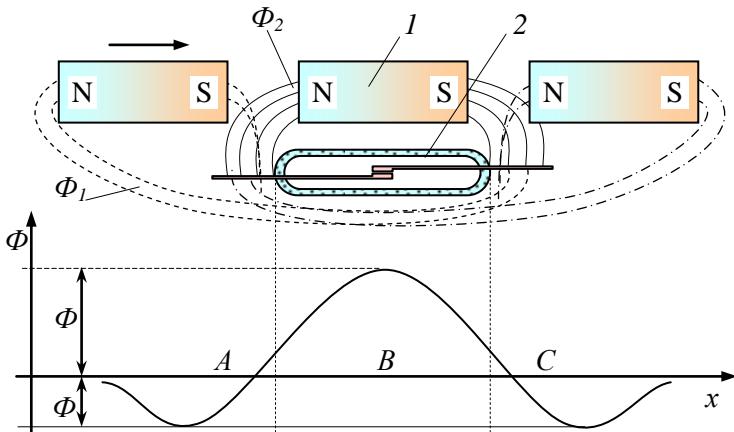
Герконом называется преобразователь с герметизированными контактами. Их выпускают с замыкающими, размыкающими и переключающими контактами.

На рис. 3.5 показан геркон с замыкающими контактами. Контактные сердечники 1 и 2 изготавливаются из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя) и ввариваются в стеклянный и герметичный баллон 3. Герметичность стеклянного баллона предотвращает окисление контактных поверхностей, и тем самым обеспечивается долговечность преобразователя.



**Рис. 3.5. Схема геркона. 1- первый контактный сердечник; 2- второй контактный сердечник; 3- стеклянный герметичный баллон**

Принцип действия показан на рис. 3.6. Ось постоянного магнита или электромагнита параллельна оси герметичного стеклянного баллона геркона. Изменение магнитного потока, проходящего через геркон, имеет сложный характер. Вначале, когда расстояние между герконом и магнитом велико, магнитный поток в зазоре геркона замыкается по пути  $\Phi_1$  (штриховая линия на рис.3.6). Затем этот поток шунтируется одним из контактов геркона и уменьшается до нуля, после чего направление магнитного потока изменяется на противоположное, так как расположение полюсов магнита относительно контактов геркона будут изменено. Этот поток обозначен  $\Phi_2$ . Геркон может сработать трижды по пути перемещения в зонах A, B и C. Если подобная последовательность работы геркона недопустима, то необходимо рассчитать магнитную систему так, что-

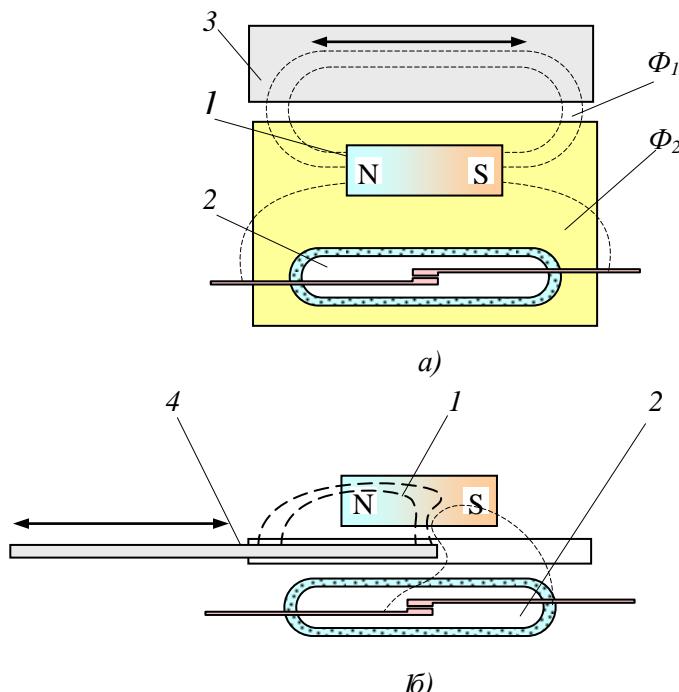


**Рис. 3.6. Принцип действия магнитного поля на геркон в зависимости от положения постоянного магнита: 1- постоянный магнит; 2- геркон**

бы в зоне *A* максимальное значение магнитного потока  $\Phi_{m1}$  было меньше потока срабатывания геркона. Добиться этого можно, изменяя конфигурацию постоянного магнита и зазор между магнитом и герконом.

На рис. 3.7, *a* приведен пример более компактной схемы расположения геркона, постоянного магнита и подвижного элемента. Постоянный магнит 1 и геркон 2 расположены в едином корпусе и укреплены неподвижно. Магнитный поток постоянного магнита замыкается через контакты геркона. При этом контакты оказываются в замкнутом положении. С подвижным элементом связан ферромагнитный шунт 3. Когда шунт занимает симметричное положение относительно постоянного магнита, магнитное сопротивление цепи шунтирования  $R_{\mu 1}$  становится значительно меньше магнитного сопротивления цепи геркона  $R_{\mu 2}$ , и магнитный поток замыкается через шунт. Контакты геркона размыкаются.

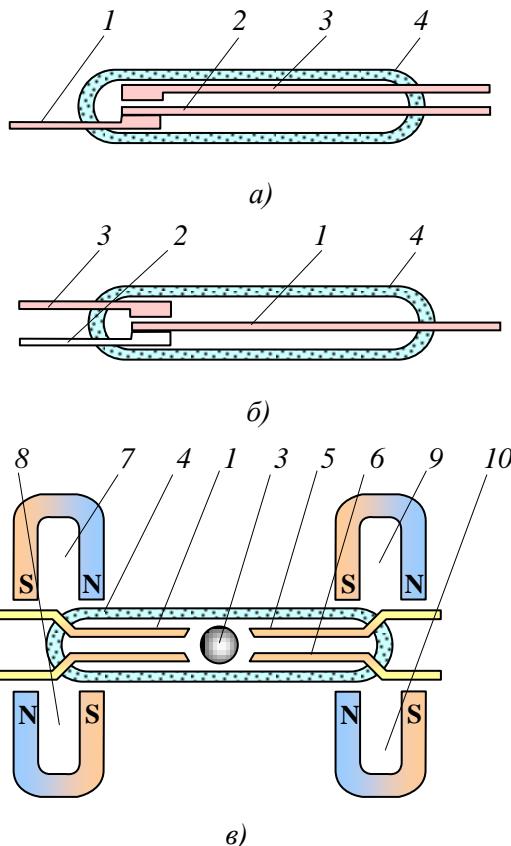
На рис. 3.7, *б*) показана схема, где постоянный магнит 1 и геркон 2 расположены в общем корпусе по обе стороны узкой щели. В начальном положении магнитный поток замыкается через контакты геркона. В узкую щель, между герконом и постоянным магнитом, входит ферромагнитный экран 3, за-



**Рис. 3.7. Схемы включения геркона:** а) шунтированием и б) при помощи экрана: 1- постоянный магнит; 2- геркон; 3- ферромагнитный шунт; 4- ферромагнитный экран

крепленный на подвижном узле объекта. В положении срабатывания магнитный поток замыкается через экран, и контакты геркона размыкаются.

Для улучшения контакта поверхности касания покрываются тонким слоем золота, родия, палладия, рения, серебра, и др. Баллон заполняется азотом с небольшой добавкой водорода около 3%. Это предотвращает окисление контактов. Контакты управляются магнитным полем как от поля постоянного магнита, так и от магнитного поля электромагнита.



**Рис. 3.8. Схемы герконов с переключающими контактами:**  
**а)** переключающий с одинаковым материалом контактов; 1, 3- неподвижные; 2- подвижный контакт; 4- стеклянный баллон;  
**б)** переключающий с неодинаковыми материалами контактов; 1- подвижный контакт; 2, 3- неподвижные контакты; 4- стеклянный баллон; **в)** со сферическим подвижным контактом; 1, 2, 5, 6- неподвижные контакты; 3- подвижный сферический контакт; 4- стеклянный баллон; 7, 8, 9, 10- магниты

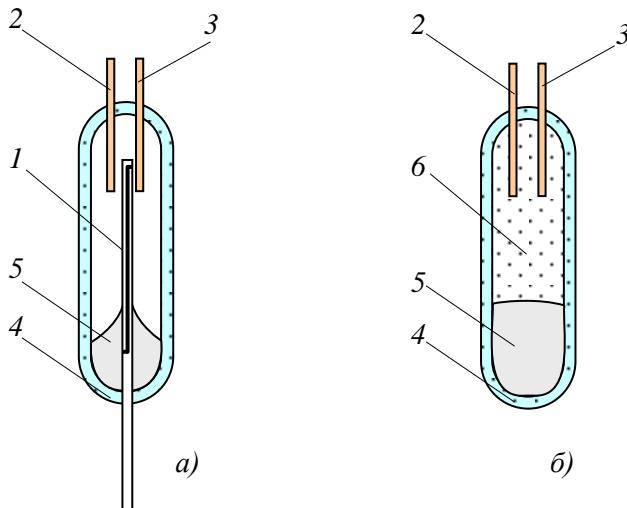
В герконе, с переключающим контактом рис. 3.8, а, неподвижные контакты 1, 3 и подвижный 2 размещены в стеклянном баллоне 4. При появлении магнитного поля контакт 2 при-

тягивается к контакту 1 и размыкается с контактом 3. Один из контактов переключающего геркона, например 2, может быть выполнен из немагнитного материала (рис. 3.8, б). Геркон, показанный на рис. 3.8, в имеет переключающий контакт 3 сферической формы. При согласном включении магнитного поля 7 и 8 контакт 3 притягивается к контактам 1, 2 и замыкает их. После отключений полей 7, 8 и при согласном включении полей 9, 10 контакт 3 замыкает 5 и 6 контакты.

Так как контакты герконов выполняют функции возвратной пружины, им придаются упругие свойства. В свою очередь упругость создает вибрацию (дребезг) контактов после удара. Это является нежелательным, которое длится около 0,25 мс при общем времени срабатывания 0,5-1 мс.

### 3.3. Ртутные герконы

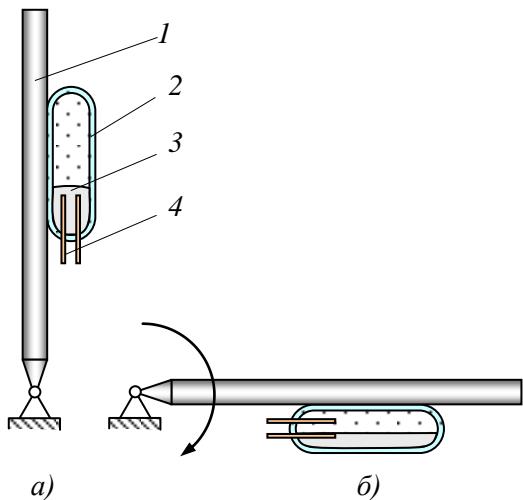
В момент удара контактов обычных контактных герконов



**Рис. 3.9. Схемы ртутных герконов: а) переключающий, б) с изолирующей жидкостью: 1- полый подвижный электрод; 2 и 3- неподвижные электроды; 4- стеклянный баллон; 5- ртуть; 6- изоляционная жидкость**

при срабатывании возникает их дребезг. Этот недостаток в ртутных герконах устранен. В переключающем герконе (рис. 3.7, а) внутри подвижного контакта 1 имеется капиллярный канал, по которому из нижней части баллона 4 поднимается ртуть 5. Ртуть смачивает поверхности касания контакта 1 с контактами 2 или 3. Ртутная пленка на контактной поверхности 1 предотвращает дребезг и не приводит к разрыву цепи. В конструкции рис. 3.9, б между контактами 2, 3 и ртутью 5 находится ферромагнитная изоляционная жидкость 6. При возникновении магнитного поля ферромагнитная жидкость 6 перемещается вниз в положение, при котором поток будет наибольшим. Ртуть вытесняется вверх и замыкает контакты 2 и 3.

Так же используются разно-видности ртутных герконов как преобразователи положения объекта (рис. 3.10). Установленный на опрокидывающемся объекте 1 геркон 2 так же будет изменять положение жидкой ртути 3. В зависимости от того, как был установлен геркон на объекте, геркон будет или замыкать контакты 4, или размыкать.



**Рис. 3.10. Схема работы ртутного геркона:** а) контакты замкнуты; б) контакты разомкнуты: 1- объект управления; 2- стеклянный баллон ртутного геркона; 3- ртуть; 4- выводы контакта

## ГЛАВА 4. Параметрические преобразователи активного сопротивления

### 4.1. Резистивные преобразователи

Резистивные преобразователи являются наиболее простыми из преобразователей. К ним относятся реостатные (потенциометрические), контактные, тензометрические, тензорезистивные и другие преобразователи. Наибольшее распространение получили реостатные, потенциометрические и тензометрические.

Реостатными или потенциометрическими преобразователями называется переменный резистор, движок (щетка) которого перемещается в соответствии со значением контролируемой величины. Реостатный и потенциометрический преобразователи отличаются только способом включения в электрическую цепь. Естественной входной величиной является перемещение движка  $x$ , которое может быть либо линейным, либо угловым. Выходной величиной преобразователей является активное сопротивление  $R$ , распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

Электрическая схема при потенциометрическом включении показана на рис. 4.1. Входное напряжение  $U_0$ , а выходное

$U_{\text{вых}}$ . Сопротивление  $R_x$  связано с перемещением движка  $l_x$  зависимостью

$$R_x = R_0 l_x / l_0,$$

где  $R_0$  - сопротивление потенциометра. Тогда при ненагруженном состоянии имеем

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0 R_x}{R_0} = \frac{U_0 l_x}{l_0}.$$

Современные реостатные преобразователи выполнены напылением проводящих материалов на подложке из диэлектрического материала. Преобра-

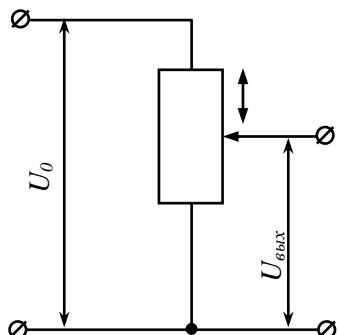
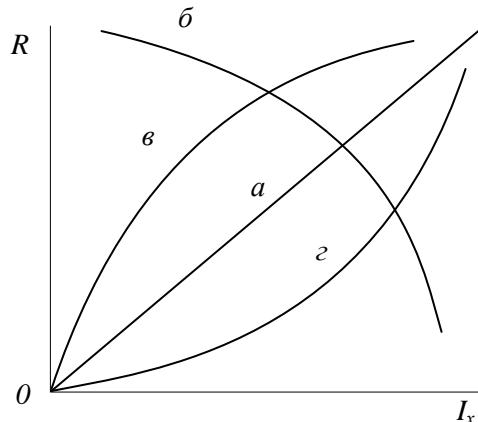


Рис. 4.1. Схема включения потенциометрического преобразователя

зователь может быть выполнен необязательно с изменением выходного сопротивления по линейному закону, линейность обеспечивается созданием соответствующего профиля проводящего слоя дорожки.

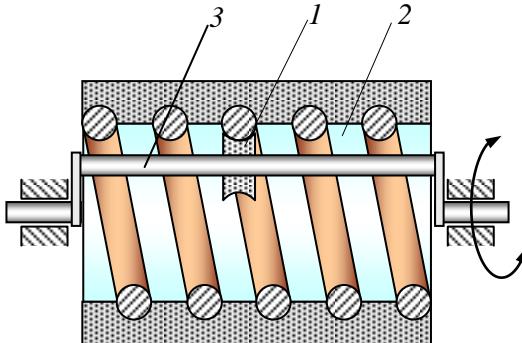
Если приращение сопротивления на единицу перемещения движка постоянно, то преобразователь имеет линейную характеристику, кривая *a*. Если же сопротивление нелинейно, такие преобразователи называются функциональными, кривые *б*, *в* и *г* (рис. 4.2).

В зависимости от материала резистивного элемента и конструкции различают проволочные, пленочные, пластиковые, фотоэлектрические и жидкостные. У пленочных приборов резистивным элементом является пленка из металла или окисла металла, напыленная на стеклянное или керамическое основание. В пластиковых преобразователях резистивный элемент выполняют из твердых токопроводящих пластмасс. Та-



**Рис. 4.2. Характеристики потенциометрических и реостатных преобразователей**

кристаллы, кривые *б*, *в* и *г* (рис. 4.2).



**Рис. 4.3. Схема многооборотного потенциометрического преобразователя: 1- подвижный ролик; 2- каркас потенциометра; 3- ось ролика**

кие преобразователи отличаются большой износостойкостью.

По типу перемещения движка преобразователи разделяют с поступательным и вращающим перемещением движка. В многооборотных преобразователях (рис. 4.3) подвижный контакт 1, имеющий форму ролика, совершает винтовое движение по каркасу 2, выполненном в виде спирали и медного стержня диаметром 1-2 мм. На каркас намотан тонкий резистивный провод. Многооборотные преобразователи позволяют получить при небольших габаритах большую длину резистивного элемента.

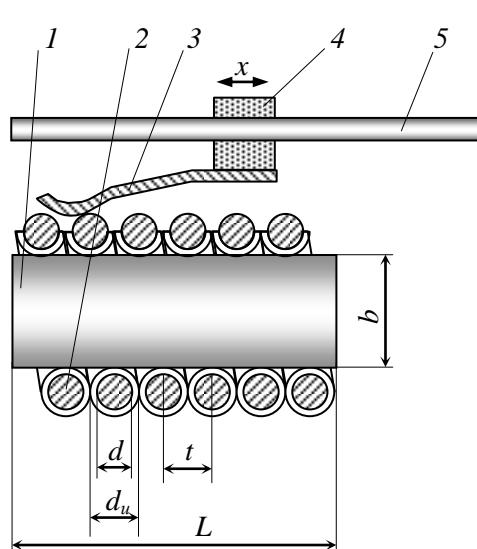


Рис. 4.4. Схема проволочного потенциометрического преобразователя: 1-каркас; 2-изолированная проволока; 3-упругая щетка; 4-ползун; 5-токосъемник-направляющая

Проволочный преобразователь представляет собой одностороннюю высокочувствительную обмотку 2, намотанную плотно на виток изолированным проводом на каркасе 1. Щетка 3 перемещена от изоляции контактной дорожкой (рис. 4.4). Каркас 1 преобразователя изготавливают из текстолита, стеклотекстолита или пресспорошка.

Формы каркасов могут быть выполнены в виде плоской или цилиндрической пластины, плоского или цилиндрического кольца и т.д.

В качестве материала для изготовления обмоток служит манганин, константан, а для прецизионных потенциометров - сплавы на основе благородных металлов: золото с медью, платиноиридиевые сплавы. Эти сплавы должны иметь высокое удельное сопротивление, высокую износостойчивость, малое

переходное сопротивление в точке контакта с материалом щетки, обеспечить сочетаемость по коэффициенту линейного расширения с материалом каркаса. Диаметры намоточных проводов выбирают в пределах 0,03-0,1 мм для прецизионных преобразователей и до 0,3 мм для более глубоких.

Индуктивное и емкостное сопротивление реостатных (потенциометрических) преобразователей обычно мало, поэтому им можно пренебречь до частот порядка нескольких десятков тысяч Гц.

Одной из определяющих характеристик преобразователей является разрешающая способность. Она показывает, при каком наименьшем изменении угла поворота перемещения подвижной системы может быть различимо изменение сопротивления реостатного преобразователя.

У непроволочных преобразователей разрешающая способность очень высокая, а у проволочных – зависит от числа витков проводящего элемента и определяется как изменение сопротивления при перемещении подвижного контакта на один виток.

Угловая разрешающая способность при равномерном шаге намотки равна:

$$\Delta y = a/n,$$

где  $a$ - угол поворота подвижной системы в пределах угла намотки резистивного элемента;  $n$ - число витков. Другими словами, угловая разрешающая способность показывает, какая часть угла приходится на один виток обмотки.

Следующей характеристикой является момент трогания. Момент трогания показывает, какая механическая мощность необходима для приведения в движение вала резистора. Момент вращения определяется как минимальный момент, необходимый для обеспечения непрерывного перемещения подвижной системы после начала ее перемещения.

Износустойчивость - это способность преобразователя сохранять свои параметры при многократных перемещениях подвижной системы. Количественно износустойчивость оценивается максимально допустимым числом поворотов или циклонов подвижной системы, при достижении которого параметры преобразователя еще остаются в пределах норм. Обычно из-

нosoустойчивость лежит в пределах 5000-20000 циклов. Расчет линейного потенциометра заключается в определении диаметра обмоточного провода и геометрического размера каркаса по найденному из расчета электрической схемы полному сопротивлению преобразователя напряжения питания и длине преобразователя.

Диаметр намоточного провода определяют из условия, чтобы плотность тока  $J$  в обмотке преобразователя не превышала допустимую плотность  $J_{don}$ .

$$J = \frac{I}{S} = \frac{4I}{\pi d^2} \leq J_{don},$$

где  $I$  - ток в обмотке,  $A$ ;  $S$  - площадь сечения обмоточного провода,  $\text{мм}^2$ ;  $d$ - диаметр обмоточного провода,  $\text{мм}$ . Значение допустимой плотности тока зависит от допускаемого перегрева, а также материала обмоточного провода и каркаса.

Наибольшее значение допустимой плоскости тока  $J_{don} = 30 A / \text{мм}^2$ , обеспечивается при использовании обмоточного провода из благородных металлов и металлических каркасов.

Диаметр обмоточного провода рассчитывают по формуле:

$$d \geq 1.13 \sqrt{I / J_{don}}.$$

По таблицам применяемых марок и диаметров проводов выбирают ближайшее большее значение диаметра обмоточного провода, диаметра с изоляцией  $d_u$ , площадь сечения провода  $S$ . Число витков находится по формуле:

$$n = \frac{L}{t} = \frac{L}{d_u},$$

где  $L$ - длина намотки потенциометра, выбираемая из конструктивных соображений,  $\text{мм}$ ;  $t$ - шаг при плотной намотке,  $\text{мм}$ .

Длину обмоточного провода  $l$  определяют, пользуясь формулой  $R=pl/S$ ,

$$l = \frac{RS}{\rho},$$

где  $R$ - плотное сопротивление преобразователя,  $\text{Ом}$ ;  $\rho$  - удель-

ное сопротивление материала провода, Ом·м.

Средняя длина одного витка  $l_{cp} = l/n$ . При намотке тонким проводом  $l_{cp}$  принимается равной периметру каркаса. Для прямоугольного каркаса со сторонами  $b$  и  $h$

$$l_{cc} \approx 2(b + h).$$

Задаваясь длиной одной стороны сечения каркаса, из конструктивных и технологических соображений находят длину другой стороны

$$b = 0.5l_{cp} - h.$$

Расчет реостатного преобразователя можно провести также из условия обеспечения необходимой чувствительности.

Проволочные и пленочные потенциометрические преобразователи широко применяются и в автомобилестроении. Они применяются в качестве преобразователей уровня топлива, положения дроссельной заслонки, расходомера воздуха и т.д.

На рис. 4.5, а приведена конструктивная схема преобразователя положения дроссельной заслонки автомобиля, а на рис. 4.5, б- схема преобразовательного активного элемента.

При повороте лимбы (на рисунке не показан) установленный на ней ползун 2 перемещает

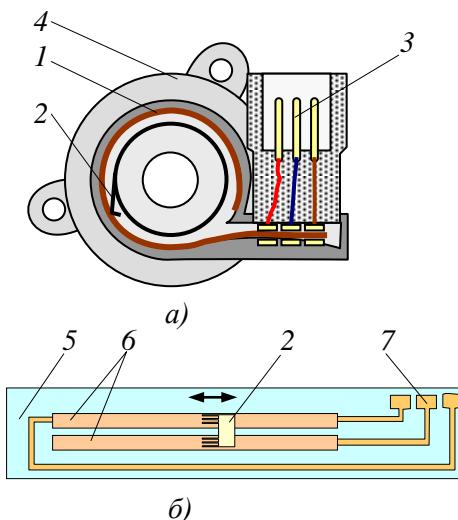
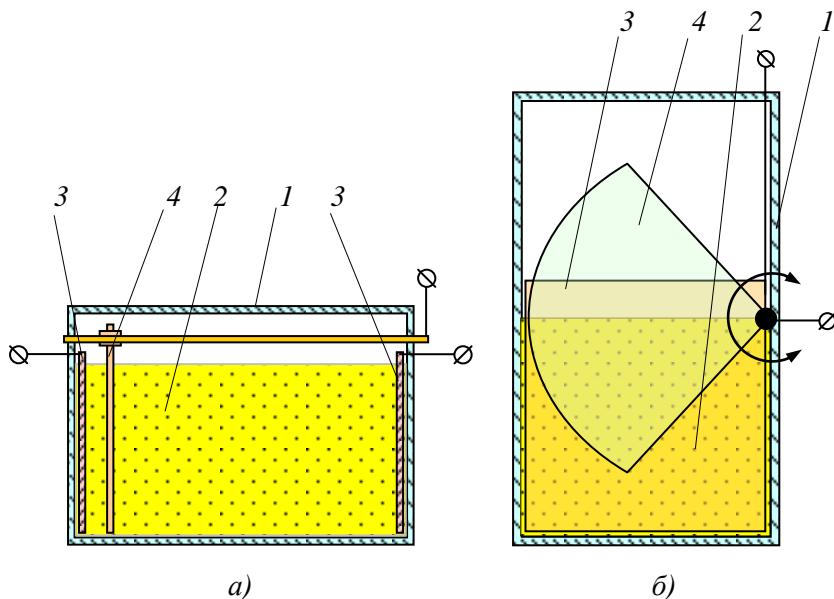


Рис. 4.5. Датчик положения дроссельной заслонки: а) схема, б) диэлектрическая пленка с напыленным проводником (преобразователь): 1- преобразователь; 2- ползун; 3- разъем; 4- пластмассовый корпс; 5- диэлектрическая пленка; 6- проводящие полоски; 7- контактные площадки

ся по поверхности пленки 1. Пленка 1 установлена внутри корпуса 4. Перемещение ползуна 2 в виде перемычки изменяет соотношение сопротивлений между средней и крайними контактными площадками 7. Активной частью преобразователя является нанесенная полоска 6 из высокоомного материала (металл или композиционный материал) на диэлектрическую пленку 5. Данные об угле открытия дроссельной заслонки выдаются в виде напряжения с потенциометра, связанного с заслонкой.

#### 4.2. Жидкостные потенциометрические преобразователи



**Рис. 4.6. Схемы жидкостных преобразователей:** а) потенциометр с изменяющейся длиной проводящего электролита; б) реостат с изменяющейся поперечной площадью электролита: 1- сосуд из диэлектрического материала; 2- токопроводящий электролит; 3- неподвижный электрод; 4- подвижный электрод

Жидкостный преобразователь конструктивно представляет собой сосуд, заполненный токопроводящим электролитом (рис. 4.6, а, б). В сосуд введены два электрода - подвижный и неподвижный. При изменении расстояния между ними изменяется длина столба токопроводящего электролита и значение его электрического сопротивления. Сопротивление между электродами также можно изменить путем увеличения или уменьшения площади ввода электродов в электролит. При вводе увеличивается площадь сечения токопроводящего столба электролита, которая в свою очередь уменьшает сопротивление по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $R$ - сопротивление токопроводящего столба электролита, удельное сопротивление электролита;  $l$ - длина токопроводящего столба электролита;  $S$ - средняя площадь поперечного сечения токопроводящего столба.

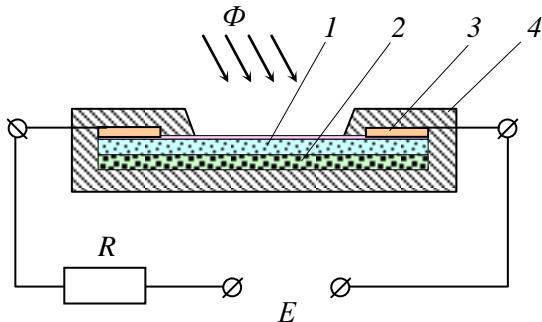
На рис. 4.6 представлены схемы изменения сопротивления: а)- путем изменения длины; б)- путем изменения средней площади поперечного сечения токопроводящего столба.

### 4.3. Фоторезисторы

К фотоэлементам, использующим явление внутреннего фотоэффекта, относят фотосопротивления (фоторезисторы). Получая энергию от светового потока, электроны могут оторваться от атомов кристаллической решетки и превратиться из связанных в полусвободные.

Если к концам такого сопротивления приложить разность потенциалов, то величина протекающего в этой цепи тока будет зависеть от освещенности фоторезистора. Получая энергию от светового потока, электроны могут оторваться от атомов кристаллической решетки и превратиться из связанных в полусвободные. Вследствие этого проводимость фотосопротивлений под действием светового потока возрастает.

Конструкция в разрезе приведена на рис. 4.7. Чувствительный к излучению света слой 1 прикреплен к изоляционной пластине 2. На краях фотослоя смонтированы электроды 3. Вся



**Рис. 4.7. Схема фоторезистора: 1- чувствительный слой; 2- изоляционная пластина; 3- электрод; 4- пластмассовый корпус с отверстием**

сборка помещена в корпусе 4 с отверстием для пропуска светового излучения. Для защиты от атмосферных и механических воздействий верхняя лицевая поверхность покрыта прозрачным материалом.

Активный слой выполняется в виде моно- или поликристаллических пленок и таблеток. Фоторезисторы с монокристаллическим фотослоем обозначаются буквой М, например ФСК-М1, ФСК-М5, а пленочные обозначаются буквой П, ФСК-П1 и т.д. К поликристаллическим фоторезисторам относятся типы СФ-1, СФ-3 и т.д. Фоторезисторы ФСК-1 – ФСК-7 изготовлены из спрессованных и спеченных порошков в таблетки.

Фоторезисторы оцениваются: интегральной чувствительностью; световой и вольт-амперной характеристиками (ВАХ).

Интегральная чувствительность фоторезисторов определяется по формуле:

$$S_{int} = \frac{I_\phi - I_m}{\Phi}, \text{ mA/lm, при } U_{nom} = const,$$

где  $I_\phi$ - ток фоторезистора при освещении;  $I_m$ - темновой ток – ток при отсутствии освещения;  $\Phi$ - световой поток.

Световая характеристика – это зависимость тока от светового потока при постоянном напряжении питания:

$$\chi_{\phi} = \frac{I}{\Phi}, \text{ при } U_{hom} = const.$$

Эта характеристика фоторезисторов нелинейна, т.к. с ростом освещенности увеличивается не только количество носителей зарядов, но и в еще большей степени – их рекомбинация.

Вольт-амперные характеристики сохраняют линейность в довольно широких пределах. К основным недостаткам можно отнести их большую инерционность. Многие из них способны работать при переменных световых потоках с частотой всего около 100 Гц.

Основные параметры фоторезисторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Тип фотопре- зистора	Чувствительность		$I_{\phi}$ (мА)	$Rm$ (МОм)	$Rm/Ra$	Sакт (мм <sup>2</sup> )	$U_{раб}$ (В)
	Монохр. (мкм)	Интегр. (А·лм -1)					
СФ2-1	0,4-0,7	10	1	15	2000	0,45	15
СФ3-1	0,7-0,9	20	1,5	30	1·105	0,75	15
ФСК-П1	0,5-0,7	4,8	2	1·103	1·104	56	100
ФСК-7	0,6-0,9	3,6	3	0,1	300	200	10

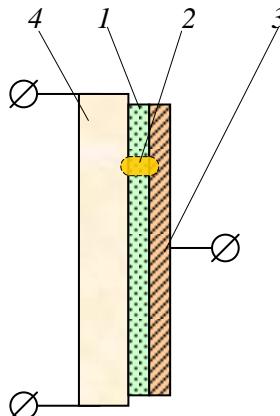
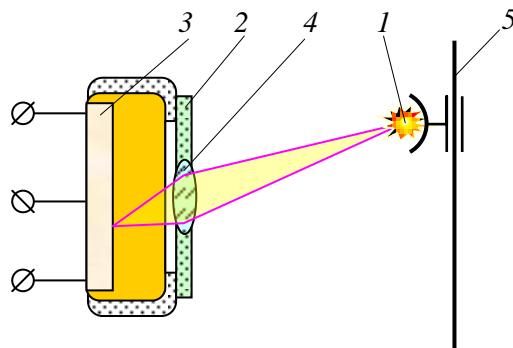


Рис. 4.8. Схема фотопотенциометрического пре-  
образователя: 1- фотопроводник; 2- световое  
 пятно; 3- токосъемник; 4- элемент с высоким  
электрическим сопротивлением

В фотопотенциометрах (рис. 4.8) роль скользящего контакта выполняет световое пятно 2, перемещающееся по фотопроводнику 1, который соединяет между собой резистивный элемент 4, выполненный в виде тонкой полоски из металла высоким сопротивлением, и токосъемник 3, имеющий малую величину сопротивления. В месте, где световое пятно 2 падает на фотопроводник 1, создается токопроводящий мостик между резистивным элементом 4 и токосъемником 3. На рис.4.9 представлена схема использования фотопотенциометра 3 с подвижным источником света 1. Маска 2 в этом случае неподвижна. Существуют также конструкции, в которых подвижной является маска, а не источник света.



**Рис. 4.9. Схема фотопотенциометрического преобразователя с подвижным источником света: 1- подвижный источник света; 2- неподвижная маска; 3- фотопотенциометр; 4- линза; 5- направляющая источника света**

#### 4.4. Магниторезисторы

В отличие от датчиков Холла полупроводниковые магниторезисторы основаны на эффекте магнитосопротивления, заключающемся в изменении удельного электрического сопротивления полупроводника, помещенного в магнитное поле. Изменение удельного электрического сопротивления магниторезистора в магнитном поле объясняется удлинением пути движения электронов в полупроводнике в результате действия силы Ло-

ренца, искривляющей их траекторию. В соответствии с принятой теорией зависимость удельного электрического сопротивления полупроводника от магнитной индукции  $B$  до  $0,3 - 0,5 \text{ T}$  (*Tesla*) определяется выражением:

$$\Delta\rho/\rho_0 = A(vB)^n,$$

где  $\Delta\rho$  – изменение удельного электрического сопротивления при индукции  $B$ ;  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $B=0$ ;  $A$  – коэффициент формы;  $v$  – подвижность электронов;  $n = 1 \div 2$  – показатель степени, зависящий от величины магнитной индукции.

При больших индукциях зависимость становится линейной, поэтому в приборах применяют предварительное смещение, помещая магниторезисторы в постоянное магнитное поле с индукцией  $0,3 - 0,5 \text{ T}$ , создаваемое с помощью постоянного магнита или электромагнита.

По сравнению с тензорезистивными, емкостными и другими преобразователями гальваномагнитные преобразователи обладают более высокой разрешающей способностью, простотой конструкции, малыми габаритами, малым потреблением мощности. Средняя чувствительность германиевых и кремниевых гальваномагнитных преобразователей от 9 до 90  $\text{В/А}\cdot\text{T}$ , максимальный управляющий ток до 45 мА, входное сопротивление от 40 до 1100 Ом, выходное – от 90 до 2500 Ом, габаритные размеры до  $17 \times 10 \times 0,6$  мм, диапазон рабочих температур от  $-150$  до  $+200^\circ\text{C}$ .

#### 4.5. Механотрон

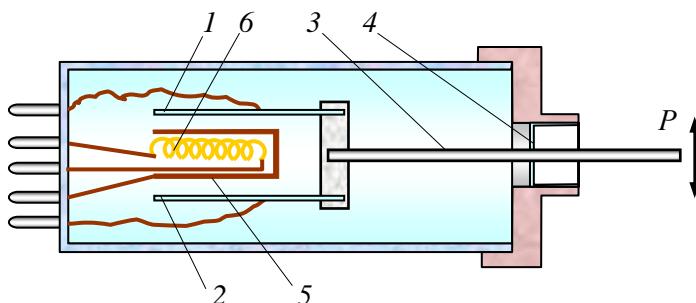
Механотрон (электронный преобразователь механических величин) представляет собой электронную лампу, отдельные электроды которой под влиянием измеряемого внешнего воздействия могут смещаться относительно других.

Конструктивно подобные преобразователи могут представлять собой диоды с перемещаемыми анодами, триоды с перемещаемым анодом или сеткой. Наиболее простой и распространенной является конструкция в виде диода с перемещаемым анодом. Конструкция механотрона выполняется таким образом, что под воздействием измеряемой величины подвижный анод перемещается практически параллельно неподвижному катоду.

При увеличении расстояния между анодом и катодом напряженность электрического поля при  $U_a=Const$  уменьшается, что ведет к уменьшению анодного тока, а при приближении анода к катоду анодный ток пропорционально возрастает.

Механотроны характеризуются чувствительностью к перемещению по току  $SI=dI_a/dl$ , по напряжению  $SV=dU_a/dl$ , к силе  $SP=dI_a/dP$ , которые определяют изменение тока или напряжения в зависимости от входной величины  $l$  или  $P$ . Чувствительность по току обычно колеблется в пределах до 100 мА/мм.

Для повышения чувствительности схемы в одной лампе обычно монтируют два анода, жестко связанных между собой и



**Рис. 4.10. Схема mechanотрона: 1 и 2- аноды; 3- штырь, воспринимающий механическое воздействие; 4- металлическая диафрагма; 5- излучатель электронов – катод; 6- подогревающая спираль катода – накальная спираль**

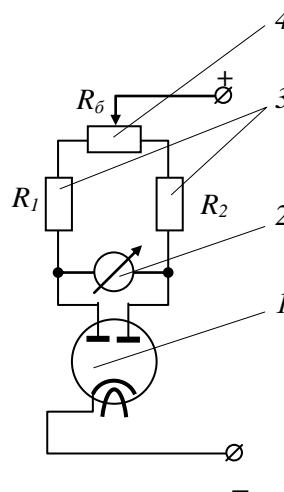
расположенных симметрично относительно катода. На рис. 4.10 показана схема расположения электродов двуханодного mechanотрона. Он предназначен для преобразования малых механических перемещений и сил в электрический сигнал. Как видно из рисунка, катод 5 с накалом 6 неподвижны, аноды 1 и 2, жестко связанные между собой, укреплены на штыре 3. Штырь 3 проходит через металлическую диафрагму 4 и может перемещаться под воздействием внешней силы.

На рис. 4.11 приведена одна из наиболее распространенных схем включения двуханодного mechanотрона.

Для обеспечения линейности выходной характеристики измерительной схемы не ниже 1% сопротивление анодных нагрузок должно быть в 2 – 2,5 раза больше внутреннего сопротивления  $R_i$  каждого диода механотрона.

Основное назначение механотрона – прецизионное измерение малых линейных и угловых перемещений и сил. С помощью механотронов можно измерять также давление от 0,1 до  $5 \cdot 10^5$  Па и ускорения от 0,1 до 1000 м/с<sup>2</sup> с чувствительностью 0,1 ÷ 2 мВ/м/с<sup>2</sup>.

Высокая чувствительность схемы позволяет в ряде случаев отказаться от усиления и подключать механоторон непосредственно к электронному осциллографу.



**Рис. 4.11. Схема включения механотрона: 1- механотрон; 2- измерительный прибор; 3- анодные нагрузки; 4- настроечный резистор**

#### Контрольные вопросы

- Назовите преимущества и недостатки контактных преобразователей.
- Можно ли отнести контактный преобразователь к реостатным?
- Что является выходной величиной контактного и потенциометрического преобразователей?

## 4.6. Тензопреобразователи

Широко применяются в автоматике и измерительной технике тензопреобразователи. Такому широкому использованию способствуют их малые размеры, масса, возможность измерения статических и динамических деформаций.

В настоящее время в практике измерений используются проволочные, фольговые, полупроводниковые и интегральные тензопреобразователи.

Проволочные тензорезисторы представляют собой отрезок проволоки, концы которой жестко закрепляются с помощью клея на упругую деформируемую деталь. Сжатие или растяжение проволоки приводит к изменению её длины, поперечного сечения и удельного электрического сопротивления, а это приводит, в конечном счете, к изменению электрического сопротивления.

Сопротивление любого проводника выражается формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $R$  – полное сопротивление,  $l$  – длина проводника,  $S$  – площадь поперечного сечения проволоки,  $\rho$  - удельное сопротивление материала проводника, то при растяжении проволоки ее сопротивление изменится на величину  $\Delta R$  и составит  $R + \Delta R$ .

Относительное изменение сопротивления тензорезистора определяется соотношением:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho},$$

где  $\Delta l$  – изменение длины,  $\Delta \rho$  – изменение удельного сопротивления,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Частное от деления относительного изменения сопротивления на относительное изменение длины проводника в пределах упругой деформации характеризуется постоянной величиной, равной

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = k,$$

где  $\varepsilon = \Delta l/l$  - относительная деформация проводника.

Величина  $k$  называется коэффициентом тензочувствительности. Большое влияние на величину тензочувствительности имеет качество подложки (основы) и клея.

Для изготовления проволочных тензорезисторов применяют материалы, имеющие высокий коэффициент тензочувствительности и малый температурный коэффициент сопротивления. Наиболее часто применяется константановая проволока диаметром 20-30 мкм.

Они конструктивно представляют собой спираль, состоящую из нескольких петель проволоки, наклеенных на тонкую бумажную, пленочную или лаковую основу. Сверху спираль закрывают такой же тонкой бумагой или пленкой (рис. 4.12).

Тензорезисторы обозначаются следующим образом: первая буква  $P$  означает, что решетка выполнена из проволоки; вторая буква означает материал решетки ( $K$  – константан); третья буква определяет основу ( $B$  – бумажная,  $P$  – пленочная, и т.д.); далее следуют величина базы и номинальное сопротивление решетки. Последняя буква, например,  $X$  – рабочая температура до  $+30^{\circ}\text{C}$ ,  $\Gamma$  – не более  $+180^{\circ}\text{C}$ . Номинальный ток не превышает 30 мА. К наиболее распространенным типам можно отнести 2ПКБ-20-100Х, 2ПКП-15-200. Номинальное сопротивление проволочных тензорезисторов от 50 до 200 Ом.

Кроме проволочных тензорезисторов, широко применяются фольговые и полупроводниковые. Преимуществом фоль-

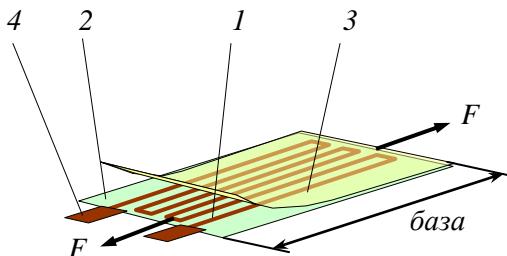
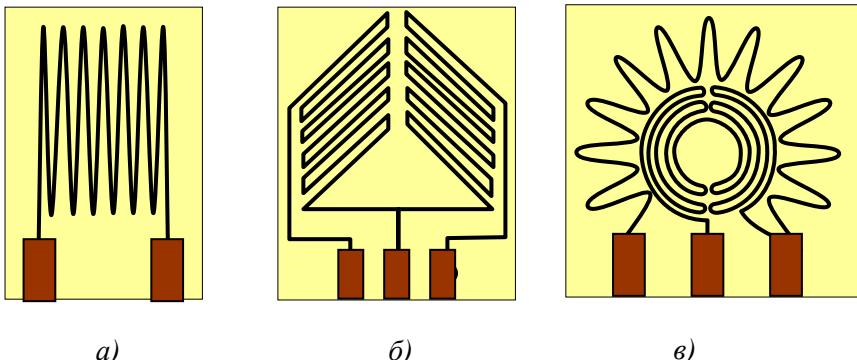


Рис. 4.12. Устройство проволочного тензопреобразователя: 1-проводник большого сопротивления; 2-подложка; 3-верхняя защитная пленка; 4-контактные

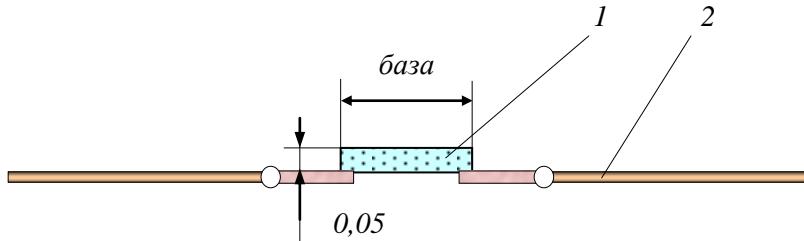


**Рис. 4.13. Фольговые тензопреобразователи: а) для измерений линейных деформаций; б) для измерений крутящих моментов; в) мембранные**

говых тензорезисторов является то, что они позволяют увеличить ток до 0,5 А благодаря большей площади контакта полосок фольги с объектом измерения. Увеличение тока способствует повышению чувствительности преобразователя. Другим преимуществом является возможность изготовления решеток сложного профиля, удовлетворяющего условиям измерений, например: а) прямоугольные— для измерения линейных деформаций; б) розеточные— для измерения крутящих моментов на круглых валах; в) мембранные— для наклейки на мембранны (рис. 4.13). Их тензочувствительность такая же, как у проволочных. К основным типам можно отнести 2ФКП – 5 - 100 х(Г), 2 ФКР – 5 – 100 х (Г), 2 ФКМ – 20 100 х (Г). Номинальные сопротивления от 50 до 200 Ом.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют ряд существенных преимуществ: чувствительность их в 50-60 раз превышает чувствительность проволочных, размеры существенно меньше, а высокий уровень выходного сигнала в некоторых случаях не требует применения сложных усилителей. Кроме того, сопротивление может быть изменено в широких пределах от 100 Ом до 5 кОм при тензочувствительности от -100 до +200.

Наиболее сильно тензоэффект выражен у германия, кремния, арсенида галлия и др. Основным отличием является боль-



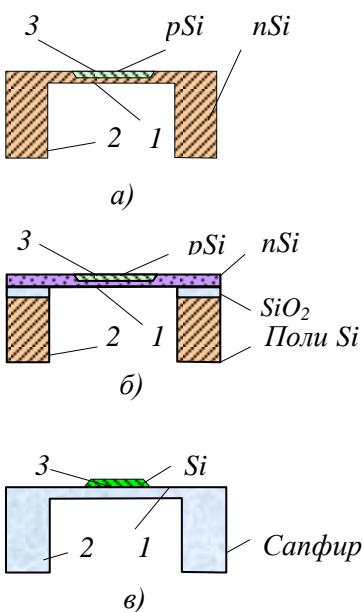
**Рис. 4.14. Полупроводниковый тензопреобразователь: 1- полупроводниковый тензоэлемент; 2- выводы**

шое изменение сопротивления при деформации. К основным типам можно отнести КТДЭ –  $p$  типа КТЭ –  $n$  типа, база которых от 3 до 7 мм. Тип Ю база от 2 до 7 мм (рис. 4.14). Номинальные сопротивления – от 45 до 750 Ом.

#### 4.7. Интегральные тензопреобразователи

Интегральные тензопреобразователи (ИТП) являются первичными измерительными преобразователями механических величин с использованием тензоэффекта в полупроводниках. Название "интегральные" означает, что технология изготовления микроэлектронная.

К основным материалам при изготовлении интегральных тензопреобразователей относятся кремний, поликремний, сапфир. Основные структуры известных ИТП давления представлены на рис. 4.15, где 1 – упругий элемент, 2 – основание, 3 – тензорезисторы. В варианте  $\delta$  применена окисная изоляция  $SiO_2$  для защиты поверхности упругого элемента (мембранны) и уменьшения температурных погрешностей преобразователей. Вариант  $\nu$  часто называется "кремний на сапфире" (КНС) и оправдан в случаях, когда необходимо обеспечить большой температурный диапазон, работу в агрессивных средах, хорошую электроизоляцию от среды, повышенную радиационную



**Рис. 4.15. Интегральные тензопреобразователи:** а) кремниевый, б) с окисной изоляцией тензоэлемента, в) кремний на сапфире; 1- упругий элемент; 2- основание тензоэлемента; 3- тензоэлемент

номиналов тензорезисторов  $T_1, T_2, T_3, T_4$ , нелинейностью преобразования давления механического напряжения, нелинейностью пьезорезистивного эффекта, нелинейностью измерительной электрической схемы. Чувствительность ИТП определяется как отношение приращения выходного сигнала к приращению приложенного давления, отнесенное к напряжению питания мостовой схемы  $E$ .

$$S_0 = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial q} \frac{1}{E}.$$

стойкость. Толщина упругих элементов является одним из его важнейших физико-химических параметров. Она определяет чувствительность, диапазон линейного преобразования и геометрические размеры преобразователя.

В ИТП чаще всего используется мостовая схема из тензорезисторов, как показано на рис. 4.16. Тензорезисторы  $R1, R4$  обладают однимзнаком тензочувствительности, а  $R2, R3$ - противоположным. Преобразовательная характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения мостовой схемы  $U_{\text{вых}}$  от приложенного к мембране избыточного давления  $q$  для различных значений температур  $T_0, T_1, T_2$ , представлена на рис.4.17. Как видно из рисунка, характеристика нелинейна. Это объясняется технологическим разбросом

Температурный дрейф нуля  $\zeta$  вызывается в основном технологическим разбросом температурных коэффициентов сопротивлений (ТКС) тензорезисторов  $T_1 - T_4$  и определяется выражением:

$$\zeta = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial T} \frac{1}{U_{\text{вых,ном}}} 100 \% / \% / \text{град} /.$$

Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) вычисляется аналогично:

$$\xi = \frac{\partial S}{\partial T} \frac{1}{S} 100 \% / \% / \text{град} /.$$

Для создания унифицированных преобразователей, обеспечивающих полную взаимозаменяемость при установке в различные устройства, применяют различные схемы настройки. Например, балансировка мостовой схемы (ток индикатора  $I_i=0$ ), термокомпенсация дрейфа нуля, термокомпенсация чувствительности.

Чувствительный элемент преобразователя давления в некоторых модификациях представляет собой кремниевый кристалл размером  $4,2 \times 2,9$  мм, в котором выполнена прямоугольная кремниевая мембрана размером  $2,3 \times 1,7$  мм. На оставшейся площади размещают диодные схемы термо компенсации, балансирующих мост резисторов, стабилизатора напряжения на опорном диоде. Подобные преобразовате-

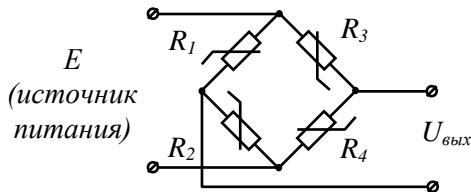


Рис. 4.16. Мостовая схема включения тензопреобразователей

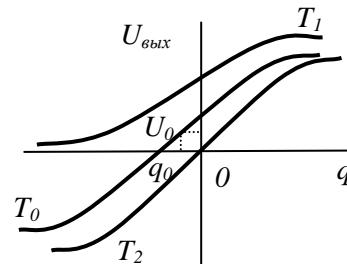
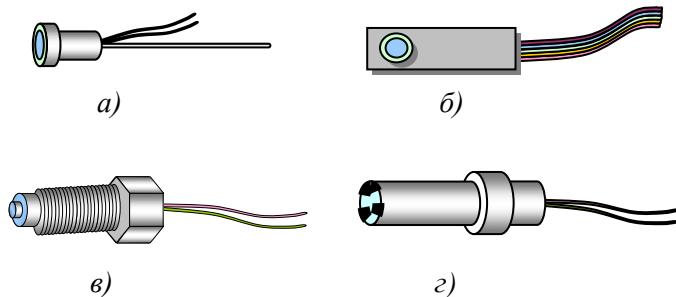


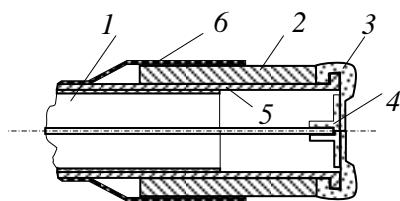
Рис. 4.17. Характеристики тензопреобразователей при включении по мостовой схеме при различных температурах



**Рис. 4.18. Миниатюрные тензопреобразователи:** а) торцевой тензопреобразователь для измерения давления; б) плоский тензопреобразователь; в) торцевой для измерения особо высоких давлений; г) торцевой тензопреобразователь с отверстиями

ли по надежности превышают традиционные преобразователи. Например: преобразователи серии LX 1601A выдерживают трехосное ускорение  $5 \times 10^4 \text{ м/с}^2$ , удар  $5 \times 10^3 \text{ м/с}^2$ , вибрацию в течение 96 часов.

Интегральные преобразователи давления общепромышленного назначения выпускает фирма KULITE. Основной вариант – конструкция торцевого типа диаметрами от 0,76 до 6,35 мм. На рис. 4.18, а – г представлены некоторые конструкции указанных преобразователей.



**Рис. 4.19. Интегральный тензопреобразователь катетерного типа:** 1- трубка; 2- кварцевая трубка; 3- клей; 4- мембрана; 5- провод; 6- защитная трубка

На рис. 4.18, б представлен преобразователь плоского варианта, представляющий собой плату из диэлектрика размерами  $9,6 \times 4,3 \text{ мм}$ .

Особый интерес представляют интегральные механоэлектрические преобразователи для биомедицинского применения. В этом направлении большое развитие получили интегральные преобразователи давления катетерного типа разработки США и России. На рис. 4.19 представлен один из вариантов наконечника катетерного преобразователя давления, где 1 – тефлоновая трубка, 2 – кварцевая трубка, 3 – эпоксидный клей, 4 – кремниевая мембрана, 5 – медный провод, 6 – растягивающая трубка. Диаметр мембранны около 0,5мм, а толщина 5мкм. Для измерения силы между двумя точками живой ткани применяют преобразователь силы, размеры которого  $1,65 \times 0,45$ мм, представлен на рис. 4.20.

В МИФИ разработаны несколько вариантов преобразователей с диаметром  $D=3$ мм и плоскостью мембранны параллельно оси катетера, а также с подстроенным резистором на кристалле. Диаметр около 5 мм.

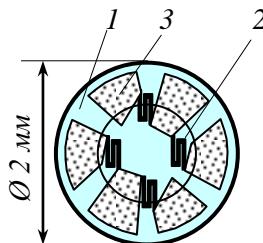
На рис. 4.21 представлен микроминиатюрный преобразователь на КНС (кремний на сапфире) – структуре. Круглая сапфировая мембрана диаметром 0,9мм ограничена кольцом из сапфира с наружным диаметром 1,6 мм. Толщина мембранны составляет 2-6 мкм. Удельное сопротивление пленки  $\rho = 0,005 \div 0,009$  Ом/см. Диаметр конструкции не превышает 2-х мм, высота 2мм.

### Контрольные вопросы

1. Какие физические величины контролируются тензорезисторами?
2. Перечислите преимущества и недостатки тензорезисторов.
3. Что является выходной величиной тензопреобразователей?



**Рис. 4.20. Тензопреобразователь особо малого размера**



**Рис. 4.21. Микроминиатюрный мембранный тензопреобразователь:**  
1- сапфировая мембра-на; 2- чувствительные элементы; 3- контактные площа-дки

## 4.8. Преобразователи крутящего момента с контактными кольцами

Преобразователи крутящего момента пользуются большим спросом в транспортном машиностроении. Существуют две основные группы по способу снятия сигнала – контактные и бесконтактные. В подавляющем большинстве преобразователей применяются тензорезисторы.

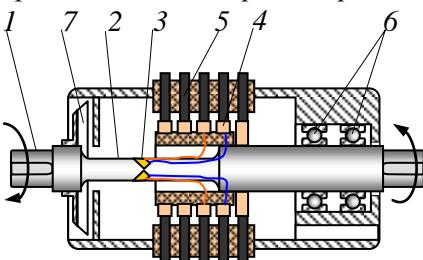


Рис.4.22. Схема контактного преобразователя крутящего момента: 1- вал; 2- чувствительный элемент вала; 3- тензорезистор; 4- контактные кольца; 5- щетки; 6- подшипники; 7- вентилятор

сийский сигнал – тензорезисторы. Тензопреобразователи приклеиваются к чувствительному элементу под углом  $45^{\circ}$  относительно продольной оси чувствительного элемента. Обычно приклеиваемых тензопреобразователей бывает 4, и их включают в схему моста. Для передачи питающего напряжения и измерительного сигнала применяют контактные кольца и щетки.

На рис.4.22 приведена обычная конструкция преобразователя крутящего момента с контактными кольцами. На цилиндрическом суженном участке, представляющем чувствительный элемент, приклеены четыре тензопреобразователя. У преобразователей для малых крутящих моментов диаметр цилиндрической части должен быть очень малым. Для вентиляции и охлаждения чувствительной части преобразователя и контактных колец устанавливают вентилятор. В целях предотвращения по-

Диапазон измерений преобразователей достигает до 50000 и более Н·м. Необходимой частью преобразователя крутящего момента является цилиндрический чувствительный элемент, деформируемый под действием крутящего внешнего момента. При этом деформация цилиндрического участка является мерой крутящего момента. Эту деформацию синхронно повторяют и преобразователи деформации в электрический сигнал – тензорезисторы. Тензопреобразователи приклеиваются к чувствительному элементу под углом  $45^{\circ}$  относительно продольной оси чувствительного элемента. Обычно приклеиваемых тензопреобразователей бывает 4, и их включают в схему моста. Для передачи питающего напряжения и измерительного сигнала применяют контактные кольца и щетки.

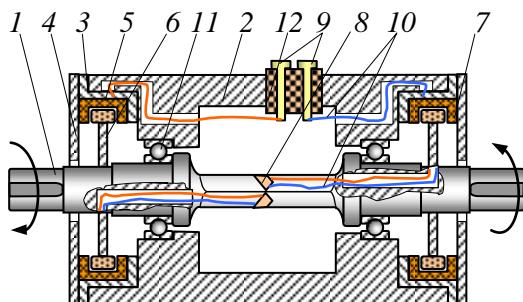
грешности при измерениях применяют одностороннее расположение подшипников. При эксплуатации корпус преобразователя крутящего момента неподвижен. Вал преобразователя вращается между ведущим и ведомым валом как соединительная муфта. Выводы тензопреобразователей, вращающихся вместе с валом, соединены с клеммами неподвижного корпуса при помощи контактных колец и щеток.

К недостаткам контактных преобразователей крутящего момента относятся наличие трущихся элементов, нестабильность переходного сопротивления, возникающая термоЭДС.

#### **4.9. Преобразователи крутящего момента с бесконтактным токосъемом**

В преобразователях крутящего момента с бесконтактным токосъемом применен трансформаторный способ передачи напряжения.

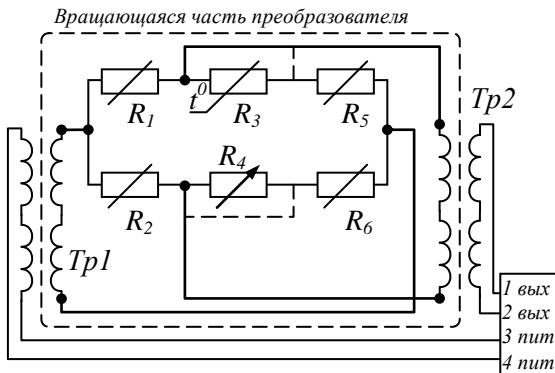
Схема преобразователя показана на рис.4.23. Вал 1 вращается в двух подшипниках 11, которые установлены в корпусе 2. Вал изготовлен из сплава стали. В средней части вала образовано квадратное сечение, на гранях приклеены под углом  $45^{\circ}$  четыре тензорезистора 8. На валу 1 закреплены еще с каждой стороны круглые платы, к которой



**Рис.4.23. Схема контактного преобразователя крутящего момента:** 1- вал; 2- корпус; 3- крышка магнитопровода; 4- крышка корпуса; 5- статорные обмотки; 6- роторные обмотки; 7- магнитопровод статора; 8- тензорезисторы; 9- выходные зажимы; 10- провода статорных обмоток; 11- подшипник; 12- проходной изолятор

приклеены роторные обмотки 6. Провода 10, соединяющие тензорезисторы 8 с роторными обмотками, проходят через отвер-

стия, проделанные на валу. Одна из обмоток ротора является обмоткой возбуждения (входной), другая – выходной (измерительная). Платы с роторными обмотками вращаются внутри магнитопроводов 7, которые представляют собой ферритовые кольца с кольцевыми пазами. В каждом из магнитопроводов установлено неподвижно статорные обмотки 5, одна из которых также является входной, а другая – выходной. Статорные обмотки соединены проводами 10 с выходными зажимами 9, через которой подается возбуждающее напряжение питания на преобразователь и снимается выходной сигнал. Магнитопроводы 7 установлены в корпусе 2 при помощи крышек 3. С торцов корпус 2 закрыт крышками 4.



**Рис.4.24. Электрическая схема включения преобразователя крутящего момента с бесконтактным питанием и съемом сигнала**

назначен для термокомпенсации моста, а  $R_4$  служит для балансировки моста.

Схема включения показана на рис.4.24. Роторные и статорные обмотки образуют два трансформатора:  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$ . Через  $T_{p1}$  на тензомост подается напряжение питания, а через  $T_{p2}$  – выходной сигнал.

Тензорезисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  образуют тензомост. Резистор  $R_3$  пред-

ставляет собой термопару.

### Контрольные вопросы

- Перечислите преимущества и недостатки преобразователей крутящего момента с контактным и бесконтактным съемом сигнала.
- Какой источник питания необходим для питания преобразователя крутящего момента с бесконтактным съемом сигнала?

## ГЛАВА 5. Параметрические преобразователи реактивного сопротивления

### 5.1. Индуктивные преобразователи

Индуктивные преобразователи представляют собой магнитную цепь с двумя малыми воздушными зазорами. Они применяются для измерения угловых и линейных перемещений, усилий, давлений, а также для определения размеров, качества и числа деталей из ферромагнитных материалов. Так же как и емкостные преобразователи, они относятся к параметрическим преобразователям реактивного сопротивления. Магнитопровод состоит из сердечника и якоря, изготовленных из ферромагнитных материалов. На сердечнике расположена катушка, включаемая в цепь переменного тока с частотой 50-10000 Гц (рис. 5.1).

Действие индуктивных преобразователей основано на изменении индуктивного сопротивления.

В конструкциях преобразователей линейные перемещения приводят к изменению либо рабочего зазора, либо площади этого зазора, либо к изменению магнитной проницаемости ферромагнитных материалов. Характеристика преобразователя с изменяющимся зазором нелинейна. Линейность характеристики зависит от длины участка  $\Delta\delta$ . Она уменьшится при смещении участка характеристики  $\Delta\delta$  в сторону больших значений (рис. 5.2, а).

Характеристика преобразователя с переменной площадью перекрытия магнитопровода линейна (рис. 5.2, б).

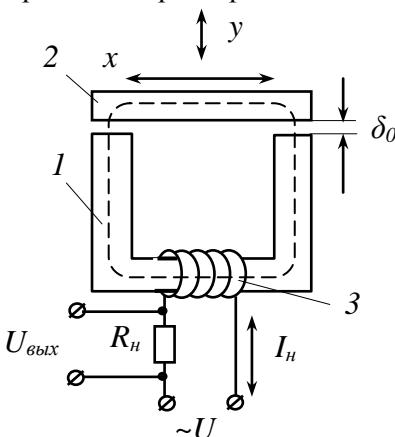
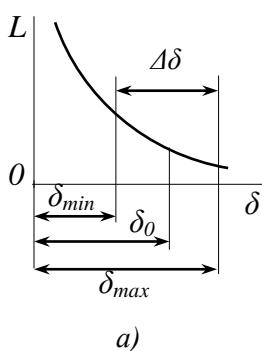
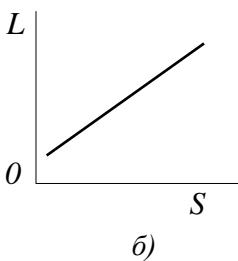


Рис. 5.1. Индуктивный преобразователь: 1-сердечник; 2-якорь; 3-катушка сердечника



a)



б)

**Рис. 5.2. Характеристики индуктивных преобразователей: а) с изменяющимся зазором; б) с постоянным зазором**

Так как в индуктивных преобразователях применяют насыщенный магнитопровод, для которого  $R_c \ll R_\epsilon$ , то

$$L = \frac{w^2}{R_\epsilon} = \frac{w^2 \mu_0 S_\epsilon}{2\delta}.$$

Диапазон рабочего участка  $\Delta\delta$  зависит от начального воздушного зазора  $\delta_0$  и составляет:

$$\Delta\delta = (0.1 - 0.2) \delta_0.$$

Индуктивность  $L$  датчика определяется по формуле:

$$L = \frac{w^2}{R_m},$$

где  $w$  - число витков катушки,  $R_m$  - полное магнитное сопротивление магнитной цепи, состоящей из магнитного сопротивления стали сердечника, якоря магнитопровода  $R_c$  и магнитного сопротивления двух воздушных зазоров  $R_\epsilon$ , т.е.

$$R_m = R_c + R_\epsilon$$

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c S_c}$$

$$R_\epsilon = \frac{2\delta}{\mu_0 S_\epsilon},$$

где  $l_c$  - длина магнитного потока по средней линии магнитопровода,  $\delta$  - воздушный зазор,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м.

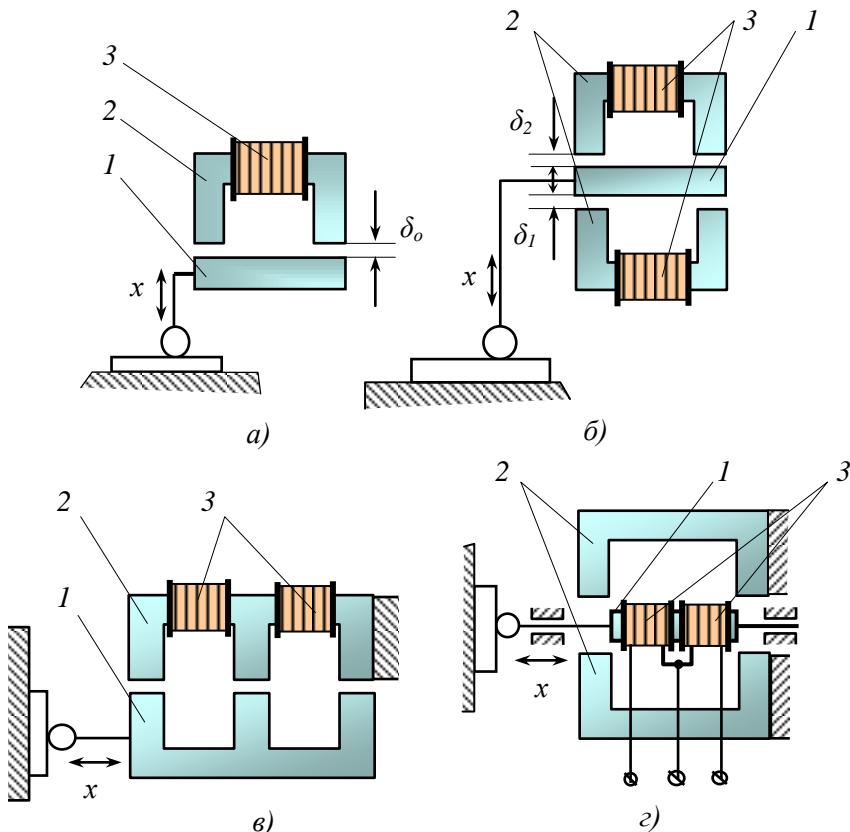


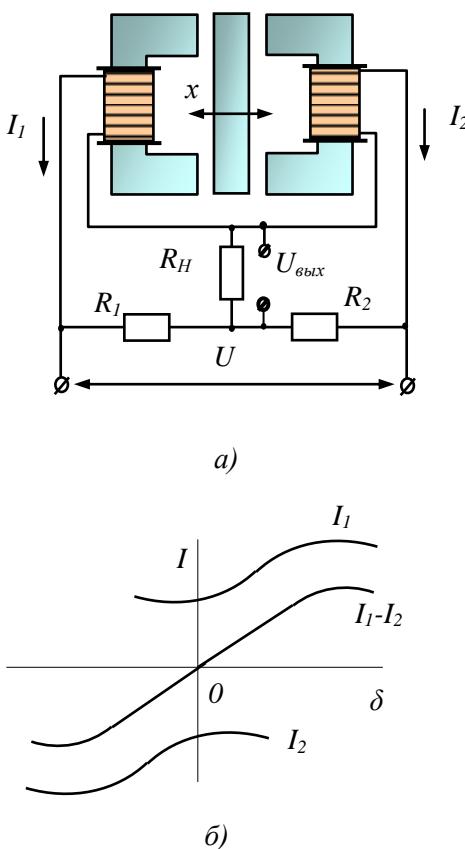
Рис. 5.3. Схемы индуктивных преобразователей: а) с изменяющимся зазором; б) дифференциальный с изменяющимся зазором; в) с изменяющейся площадью зазора; г) соленоидного типа: 1- якорь преобразователя; 2- неподвижный сердечник; 3- катушка

Ток в катушке имеет значение:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{2U\delta}{\omega W^2 \mu_0 S_s},$$

где  $U$ - напряжение питания преобразователя;  $\omega$ - частота переменного тока питания;  $L$ - индуктивность преобразователя;  $S$ - площадь активного поперечного сечения воздушного зазора.

На рис. 5.3, *a*, *b* приведены конструкции для измерения перемещений изменением рабочего зазора, а на рис. 5.3, *в*- изменением площади  $S_e$  воздушного зазора. Для измерения относительно больших перемещений применяют преобразователи соленоидного типа (рис. 5.3, *г*).



**Рис. 5.4. Реверсивный индуктивный преобразователь:** *а*) схема; *б*) статическая характеристика

Достоинствами этих преобразователей является высокая чувствительность, отсутствие механического контакта, достаточная механическая мощность, простота конструкции. К недостаткам относятся нелинейность характеристики, наличие нулевого сигнала, существенная сила притяжения якоря к сердечнику, зависимость выходного сигнала от частоты и напряжения питания. В реверсивных преобразователях значительно устраняются эти недостатки. Реверсивный преобразователь состоит из двух нереверсивных с одним общим якорем (рис. 5.4, *а*).

Статическая характеристика реверсивного преобразователя более линейна. Чувствительность повышается вдвое. При нейтральном положении реакция на якорь равна нулю. При магнитной и электрической симметрии нуле-

ного преобразователя более линейна. Чувствительность повышается вдвое. При нейтральном положении реакция на якорь равна нулю. При магнитной и электрической симметрии нуле-

вой сигнал отсутствует. На рис. 5.4, б приведена статическая характеристика реверсивного индуктивного преобразователя. При отклонении якоря  $U_n$  возрастает линейно. Если перемещение изменяется в обратную сторону, то фаза  $U_n$  меняется на  $180^\circ$ .

Основным недостатком реверсивных преобразователей является сложность балансировки. Они применяются для входных перемещений от 0,001-1 мм. Для перемещений от 1 - 60 мм применяется соленоидный преобразователь.

В автоматике (в гироскопических устройствах) применяется трансформаторный индуктивный преобразователь, принцип действия которого основан на изменении взаимной индуктивности потокосцепления и значения ЭДС в обмотках преобразователя при перемещении ферромагнитного сердечника.

## 5.2. Сигнализатор ВБ (выключатель бесконтактный)

Транзисторный вариант принципиальной электрической схемы автогенераторных индуктивных преобразователей (автогенераторных сигнализаторов заданной величины) контролируемого параметра приведен на рис. 5.5. Преобразователь состоит из  $LC$ -автогенератора на транзисторе  $V_1$ , в колебательный контур которого включена катушка индуктивности, являющаяся чувствительным элементом сигнализатора. Выход автогенера-

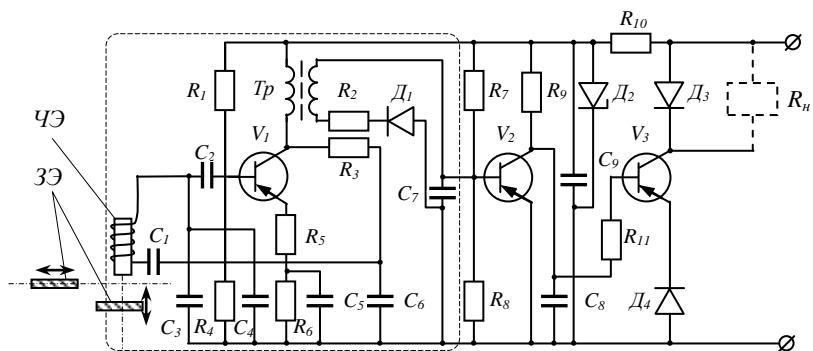
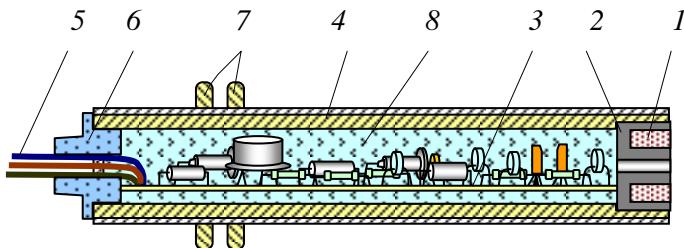


Рис. 5.5. Принципиальная электрическая схема индуктивного бесконтактного преобразователя

тора через согласующий трансформатор  $T_p$ , выпрямитель  $D_1$  подключен ко входу ключей  $V_2$  и  $V_3$ . Транзистор  $T_2$ , являющийся усилителем и инвертором, управляет транзистором  $T_3$ , работающим в ключевом режиме.

Принцип действия преобразователя заключается в следующем. При достижении величины параметра заданного значения задающий элемент ЗЭ, приводимый в движение контролируемым параметром косвенно или непосредственно, приближа-



**Рис. 5.6. Конструктивная схема индуктивного бесконтактного преобразователя:** 1- обмотка чувствительного элемента; 2- сердечник чувствительного элемента; 3- монтажная плата; 4- латунный корпус преобразователя; 5- выводы; 6- диэлектрическая заглушка; 7- установочные гайки; 8- эпоксидная заливка

ется к торцу катушки индуктивности чувствительного элемента ЧЭ, подключенного в колебательный контур. При этом генерация срывается. Срыв генерации происходит в результате активных потерь, вносимых в колебательный контур за счет появления вихревых токов в электропроводящем металлическом теле задающего элемента. При срыве генерации на вторичной обмотке согласующего трансформатора  $T_p$  напряжение отсутствует, транзистор  $T_2$  запирается; следовательно, ключевой транзистор  $T_3$  открывается, и напряжение выхода подается на нагрузку  $R_n$ .

Включение диода  $D_3$  в коллекторную цепь ключа  $T_3$  обеспечивает возможность подключения к сигнализатору нагрузки, имеющей индуктивность (катушка реле).

При величинах контролируемого параметра, меньших заданного, задающий элемент ЗЭ удаляется от торца чувствитель-

ного элемента, возникает генерация, ключ  $T_2$  отпирается, и, следовательно, запирается ключ  $T_3$ . На нагрузке напряжение резко снижается, т.е. сигнал отсутствует.

### 5.3. Магнитострикционные преобразователи

Действие магнитострикционных преобразователей основано на магнитострикционном эффекте, присущем всем ферромагнитным материалам. Магнитострикция в переводе означает изменение размеров и формы ферромагнитного тела при его намагничивании. Различают прямой и обратный магнитострикционный эффекты. Если при изменении магнитного поля изменяются размеры тела вдоль силовых линий – прямой, а если предварительно намагниченное ферромагнитное тело при деформировании изменяет первоначальное магнитное поле – обратный. Прямой эффект применяется только в излучателях, а обратный магнитострикционный эффект – в преобразователях давлений, акустики и т.д. Диапазон акустических частот – до 100 кГц.

Относительная деформация ферромагнитного материала  $\Delta l/l$  под действием магнитного поля пропорциональна квадрату индукции  $B$ . Такая же зависимость от индукции будет и для механических напряжений  $T$ , возникающих в закрепленном стержне

$$T = \gamma B^2, \quad (5.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, зависящий от свойства материала стержня.

Рассмотрим обратный магнитострикционный эффект. Пусть магнитострикционный стержень помещен в постоянное магнитное поле, которое создает внутри стержня начальную индукцию  $B_0$ . Намагничающее постоянное поле называют полем поляризации, а намагниченный стержень – поляризованным. Поляризуют стержень или постоянным магнитом, или пропусканием постоянного тока через обмотку, наложенную на стержень.

Если на поляризованный стержень действовать переменной силой, то он деформируется и, следовательно, напряженность поля внутри стержня будет изменяться. Изменения

напряженности  $\Delta H$  магнитного поля в стержне пропорциональны деформации – относительному изменению длины стержня  $\Delta l/l$ :

$$\Delta H = \alpha \Delta l/l,$$

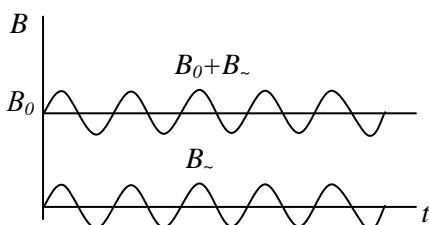
где  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий обратный магнитострикционный эффект и зависящий от материала стержня и начальной индукции поля поляризации  $B_0$ . При заданном значении  $B_0$  величину  $\alpha$  называют магнитострикционной постоянной, она измеряется в единицах напряженности, т.е. в амперах на метр А/м.

В результате изменения напряженности магнитного поля изменяется магнитный поток, проходящий через витки обмотки, и в которой возбуждается ЭДС индукции. При изменении внешней силы, действующей на магнитострикционный стержень, на выводах обмотки появится электрическое напряжение, пропорциональное скорости изменения силы.

Существуют неполяризованные и поляризованные системы. Неполяризованной называют систему, у которой начальное намагничивание отсутствует  $B_0=0$ . В данном случае, как следует из формулы (5.1), магнитострикционные напряжения и магнитная индукция в стержне связаны квадратичной зависимостью. Поэтому направление механических напряжений не зависит от направления поля индукции. При изменении знака поля относительная деформация не изменится. За каждый полупериод переменного поля стержень испытывает полный цикл сжатия или

растяжения и возвращается в исходное состояние, то есть произойдет удвоение частоты механических колебаний.

В поляризованной системе, кроме переменной составляющей магнитной индукции  $B$ , существует и постоянная индукция  $B_0$ . Суммарная индукция будет иметь вид:



**Рис. 5.7. График изменения поляризованной магнитострикционной системы**

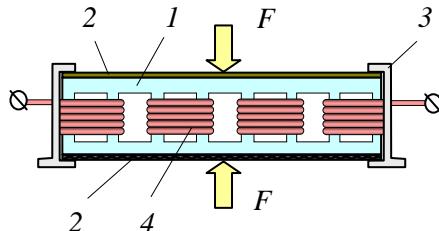
$$B=B_0+B_m \sin \omega t,$$

где  $B_m$  – амплитудное значение переменной составляющей магнитной индукции,  $\omega$  – частота колебаний индукции. График изменения магнитной индукции поляризованной магнитострикционной системы показан на рис. 5.7.

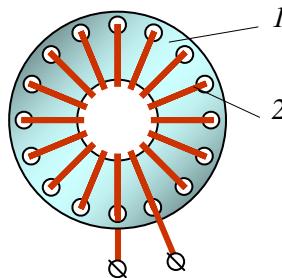
Применяются магнитострикционные преобразователи стержневого и кольцевого типов. Преобразователь стержневого типа представляет собой сердечник, набранный из тонких электрически изолированных пластин, изготовленных из магнитострикционного материала и предварительно отожженных после штамповки, с наложенной на стержни обмоткой (рис. 5.8). Такая конструкция

позволяет значительно уменьшить потери на вихревые токи, каждая обмотка охватывает два стержня и, следовательно, в одну цепь входят четыре стержня. Пластины сердечника 1 скрепляют крепежными призмами 3. Торцевые поверхности накладок принимают механические усилия или акустические колебания. На одну из накладок обычно наклеивают экран 2 из пористой резины с малым волновым сопротивлением.

Обмотку 4 укладывают на стержни так, чтобы направления витков на соседних стержнях одной магнитной цепи были противоположными. В этом случае магнитные потоки, создаваемые в обоих стержнях, суммируются. На соседних стержнях разных магнитных цепей направление витков



**Рис. 5.8. Магнитострикционный преобразователь стержневого типа:** 1- сердечник преобразователя; 2- упругий экран; 3- крепежные призмы; 4- обмотки преобразователя



**Рис. 5.9. Цилиндрический магнитострикционный преобразователь:** 1- сердечник; 2- обмотка

одинаковое.

Цилиндрический преобразователь представляет собой кольцо, набранное из тонких пластин магнитострикционного материала с торOIDальной намоткой (рис. 5.9). При воздействии на наружную боковую поверхность равномерно распределенного давления акустического поля кольцо совершает пульсирующие колебания. В соответствии с обратным магнитострикционным эффектом начальное магнитное поле предварительно поляризованного кольца изменяется, а на концах обмотки возникает переменная разность потенциалов.

Тонкое кольцо из магнитострикционного материала, как упругий элемент, не отличается от пьезокерамического кольца.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой источник питания применяется для питания индуктивных преобразователей?
2. В каких случаях целесообразнее применять параметрические преобразователи индуктивного сопротивления?
3. Назовите преимущества и недостатки электронных индуктивных бесконтактных преобразователей.
4. Какое явление называется магнитострикцией?
5. Что является входной величиной магнитострикционных преобразователей?

## 5.4. Емкостные преобразователи

В основу емкостного преобразователя положена зависимость изменения емкости электрического конденсатора при воздействии на него измеряемой величиной. Он представляет собой две проводниковые поверхности (обкладки) 1 с контактными выводами 3, между ними вставлен диэлектрический материал 2 (рис. 5.8). Обычно они выпускаются в плоском и цилиндрическом исполнениях. Емкость плоского конденсатора определяется формулой:

$$C = 0,088 \frac{\varepsilon S}{d}, \text{ пФ},$$

где  $S$  – действующая площадь обкладок,  $\text{см}^2$ ;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\text{пФ/см}$  (для воздуха  $\varepsilon=1$ );  $d$  – толщина диэлектрика или изолятора между обкладками, см.

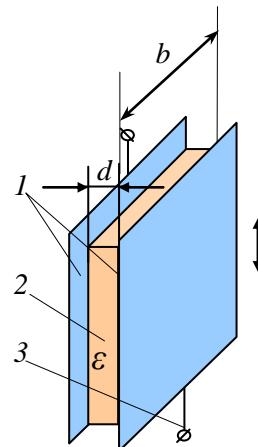
Емкостный преобразователь может работать с использованием изменения действующей площади, расстояния между пластинами или диэлектрической проницаемости.

Наиболее применимы для измерения линейного перемещения преобразователи, в которых преобразование измеряемой величины происходит за счет изменения площади.

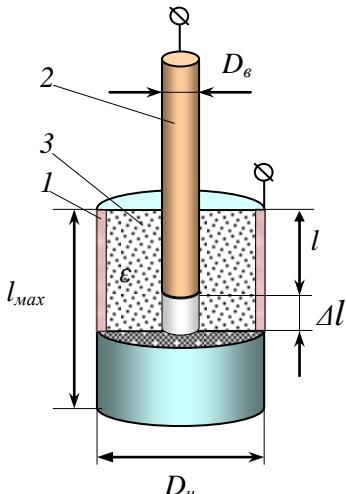
Если обозначить емкость в начале процесса  $C_0$ , а в момент изменения  $C_1$ , то изменение емкости  $\Delta C$ , составит

$$\Delta C = C_0 - C_1 = 0,088 \frac{\varepsilon}{d} \Delta S.$$

Если считать, что относительное изменение используемого параметра преобразователя характеризует коэффициент преобразования, то в емкостных преобразователях с переменной площадью он будет равен:



**Рис. 5.8. Общая схема емкостного преобразователя: 1- обкладка; 2- диэлектрик; 3- выводы**



**Рис. 5.9. Схема цилиндрического емкостного преобразователя:** 1-наружная цилиндрическая обкладка; 2- внутренняя цилиндрическая обкладка; 3- диэлектрик

$$\Delta C/C = \Delta S/S,$$

т.е. будет тем больше, чем большее относительное изменение площади измерительного конденсатора (емкостного преобразователя) при единичном изменении входного сигнала.

Наряду с плоскими конденсаторами для измерения перемещения широко применяются цилиндрические конденсаторы (рис. 5.9), в которых имеются два концентрических цилиндра 1 и 2, сдвигаемые относительно друг друга. Внутренний цилиндр 2 диаметром 2 – 4 мм отделен от внешнего 1 изоляционным слоем 3 с большой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Емкость цилиндрического конденсатора определяется формулой:

$$C = 0.088 \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{D_h}{D_e}},$$

а изменение емкости при смещении на  $\Delta l$

$$\Delta C = 0.088 \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_h}{D_e}} \Delta l.$$

Таким образом, во всех случаях наблюдается линейная зависимость между изменением емкости  $\Delta C$  и изменением площади  $\Delta S$  или перемещением  $\Delta l$ .

При измерениях, связанных с вращением или поворотом исследуемого узла, используются преобразователи, подобные переменным конденсаторам. Статор 2 этих конденсаторов (рис. 5.10) обычно жестко закрепляется на неподвижной детали, а ротор 1 жестко связывается с узлом, угол поворота которого подлежит измерению.

Вид характеристики такого преобразователя определяется формулой:

$$C = C_0 + 0,088 \frac{\varepsilon \psi \phi}{d},$$

где  $C_0$  – начальная емкость преобразователя;  $\phi$  – угол поворота подвижных пластин относительно неподвижных;  $\psi$  – изменение площади на единицу угла поворота.

Конструктивное оформление преобразователей достаточно простое, поэтому они нашли большое применение.

Принцип действия преобразователя с изменением зазора показан на рис. 5.11. Принимая те же обозначения, что и в предыдущем случае, найдем абсолютное изменение емкости

$$\Delta C = 0,088 \frac{\varepsilon S}{d} \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d}$$

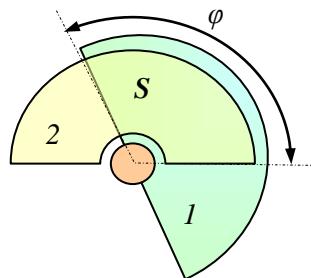
а относительное изменение

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d}.$$

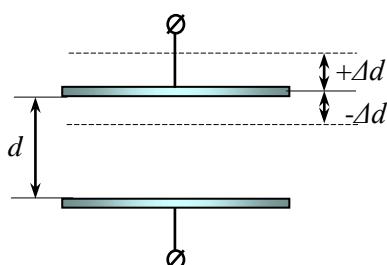
Здесь «+» соответствует уменьшению емкости, а «-» - увеличению.

При изменении зазора не более чем на 5% ( $\Delta d_{max} = \pm 0,05d$ ) относительное изменение емкости практически равно относительному изменению зазора независимо от направления перемещения подвижного электрода.

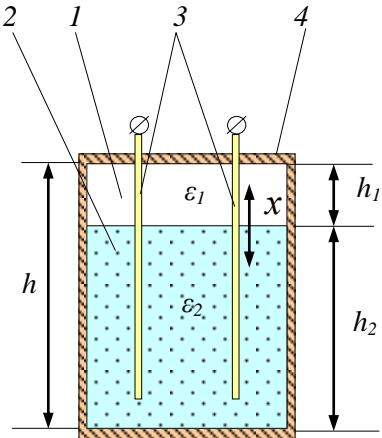
Примером емкостного преобразователя с изменением расстояния между электродами является конденсаторный



**Рис. 5.10. Схема емкостного преобразователя с поворотной обкладкой:**  
1- подвижная обкладка (ротор); 2- неподвижная обкладка (статор)



**Рис. 5.11. Схема изменения зазора емкостного преобразователя**



**Рис. 5.12. Схема работы емкостного преобразователя при перемещении диэлектрика перпендикулярно к поверхности обкладок (пластиин): 1- воздух; 2- жидкость; 3- обкладки; 4- корпус преобразователя**

микрофон. На этом же принципе основаны емкостные мембранные преобразователи давления или силы.

Преобразователи с изменением диэлектрической проницаемости могут быть осуществлены в двух вариантах: с перемещением диэлектрика перпендикулярно (рис. 5.12) или параллельно (рис. 5.13) плоскости пластин.

В первом случае при различных величинах диэлектрической проницаемости, воздуха  $\epsilon_1 = \epsilon_\infty$  и перемещающегося диэлектрика  $\epsilon_2$  образуются два параллельно соединенных конденсатора, общая емкость которых равна:

$$C = C_1 + C_2 = 0,088 \frac{\epsilon_\infty b h_1}{d} + 0,088 \frac{\epsilon_2 b h_2}{d},$$

где  $b$  и  $h$  – линейные размеры пластин преобразователя.

Учитывая, что  $\epsilon_\infty = 1$ , а  $h_1 = h - h_2$ , и полагая  $\epsilon_2 = \epsilon$ , получим:

$$\begin{aligned} C &= 0,088 \frac{b}{d} (h - h_2 + \epsilon h_2) = \\ &= 0,088 \frac{bh}{d} + 0,088 \frac{bh_2}{d} (\epsilon - 1) = C_\infty + \Delta C, \end{aligned}$$

где

$$\Delta C = 0,088 \frac{bh_2}{d} (\epsilon - 1).$$

Преобразователь с диэлектриком, изменяющимся по высоте ( $d_2$ ) параллельно плоскости электродов (рис. 5.13), особенно подходит для жидких диэлектриков. Такой преобразователь

подобен конденсатору с двухслойным диэлектриком, емкость которого определяется соотношением:

$$C = \frac{0,088S}{\frac{d_1 + d_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}} = \frac{0,088S}{\frac{d - d_2 + d_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}}.$$

### Измерение

больших изменений емкости относительно несложного и может быть выполнено разнообразными способами. Для определения малых изменений емкости используют методы: мостовой, резонансный и биений.

Емкостные преобразователи обладают рядом достоинств: высокой чувствительностью, простотой, малыми габаритами и массой, малой инерционностью и незначительным обратным воздействием на измеряемый объект.

К недостаткам можно отнести: большое внутреннее сопротивление, необходимость в источнике питания высокой частоты, потребность в экранировке преобразователей для уменьшения влияния внешних электрических полей и короткие соединительные выводы. Особенно сильное влияние на погрешность оказывают изменения температуры и влажности окружающей среды.

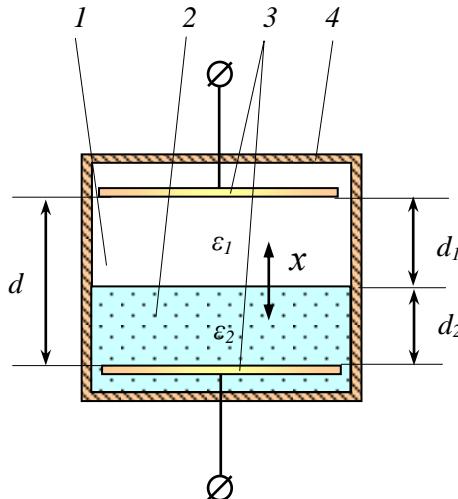


Рис. 5.13. Схема работы емкостного преобразователя при перемещении диэлектрика параллельно к поверхности обкладок (пластин): 1- воздух; 2- жидкость; 3- обкладки; 4- корпус преобразователя

## 5.5. Сенсорный преобразователь

Работа преобразователя основана на усилении напряжения, наведенного в теле человека. Тело человека, как и любой проводник, имеет определенную электрическую проводимость (емкость) и поэтому может служить своеобразной антенной, улавливающей электромагнитные колебания обычно промышленной частоты 50 Гц. Наводки могут быть в пределах 1-3 В.

При соприкосновении человека со входом усилителя это напряжение усиливается и подается к исполнительному элементу. Электрод, соединенный с входом усилителя, называется сенсором. На рис. 5.14 приведена принципиальная схема сенсорного преобразователя.

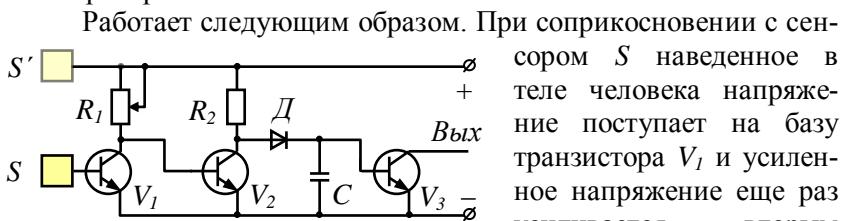


Рис. 5.14. Схема сенсорного электронного преобразователя

Выпрямленное напряжение диодом  $D$  сглаживается конденсатором  $C$  и подается на базу выходного транзистора  $V_3$ . Транзистор  $V_3$  будет в открытом состоянии до тех пор, пока рука касается сенсора  $S$ . Уменьшая чувствительность усилителя переменным резистором  $R_1$  и применяя второй сенсор  $S'$  (на рисунке показан пунктиром) можно управлять выходным сигналом только при одновременном касании одной рукой сенсора  $S$ , а другой  $S'$ .

### Контрольные вопросы

1. Какой источник питания применяется в цепях емкостных преобразователей?
2. Назовите преимущества и недостатки емкостных преобразователей.
3. Что является входной величиной, а что является выходной емкостных преобразователей?

## ГЛАВА 6. Генераторные преобразователи

### 6.1. Магнитоэлектрические преобразователи

Магнитоэлектрические преобразователи относятся к разряду генераторных преобразователей, так как при воздействии входной величины они способны генерировать электрическую энергию.

В этих устройствах используется явление электромагнитной индукции – наведение электродвижущей силы (ЭДС) в электрическом контуре, в котором меняется магнитный поток.

Наведение ЭДС происходит независимо от причины изменения магнитного потока: перемещается ли обмотка в постоянном магнитном поле или магнит в неподвижной обмотке. Величина ЭДС, индуцированная в катушке, определяется формулой:

$$e = w \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $e$  – мгновенное значение ЭДС;  $w$  – число витков катушки преобразователя;  $\Phi$  – магнитный поток.

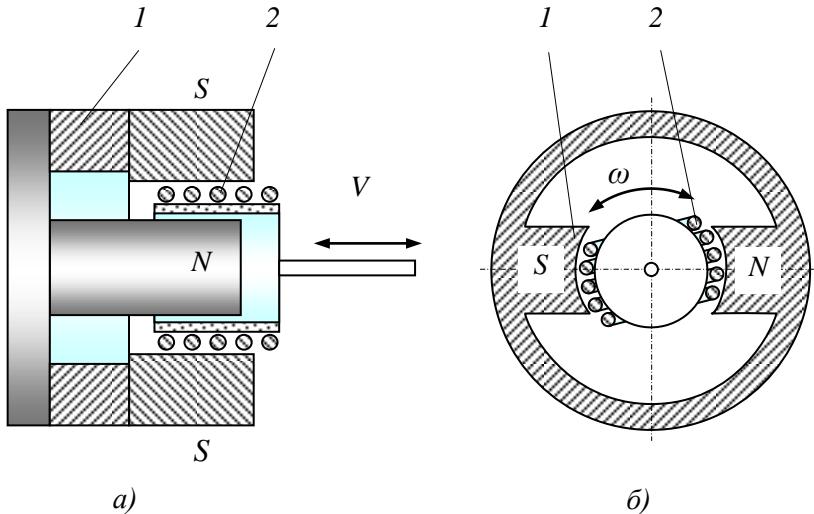
Из этого соотношения видно, что наводимая ЭДС зависит не от абсолютного значения магнитного потока, а от скорости его изменения внутри контура. Поэтому индукционные преобразователи могут применяться непосредственно только для измерения скорости перемещений. Для измерения перемещений или ускорений в контур надо ввести соответственно интегрирующую или дифференцирующую цепь.

На рис. 6, *a* представлена схема для преобразования поступательного движения, а на рис. 6, *б* вращательного движения.

В первом случае при взаимном перемещении постоянного магнита и катушки с относительной скоростью  $V$  индуцируемая ЭДС будет равна:

$$e = wBlV \cdot 10^{-8} = wBl \frac{dx}{dt} \cdot 10^{-8}; B,$$

где  $w$  – число витков катушки;  $B$  – индукция магнитного поля, Гс;  $l$  – длина проводника, пересекающего магнитное поле, см;  $x$  – относительное перемещение, см.



**Рис. 6.1. Магнитоэлектрические преобразователи:** а) линейного перемещения, б) поворота:  
 1- постоянный магнит; 2- подвижная катушка

Схема на рис. 6, б характерна для тахогенератора, используемого в качестве преобразователя при вращении. Мгновенное значение ЭДС на выходе определяется формулой:

$$e = BlwV \cdot 10^{-8} \sin 2\pi nt,$$

где  $l$  – длина одного витка катушки, см;  $V$  – линейная относительная скорость вращения катушки, см/с;  $n$  – частота вращения катушки.

Из формул видно, что для увеличения чувствительности преобразователя выгоднее применять катушки с большим числом витков  $w$ . Однако при этом необходимо учитывать, что простое увеличение числа витков при заданном сечении катушки возможно только за счет уменьшения диаметра проволоки, что связано с увеличением сопротивления  $R$ . Сопротивление при конечной величине нагрузки не может быть сколь угодно большим, а должно быть согласовано с сопротивлением нагрузки (последующего блока, например, усилителя). Поэтому число витков надо подобрать из условия оптимальности сопротивле-

ния и ЭДС. Увеличение числа витков за счет увеличения толщины катушки и воздушного зазора магнитной системы приводит к падению величины индукции  $B$ .

Линейная зависимость ЭДС от перемещения катушки сохраняется до тех пор, пока амплитуда перемещений катушки не превышает величины, когда катушка выходит из рабочего зазора, то есть из области равномерного магнитного поля.

## 6.2. Преобразователь частоты вращения

Одним из элементов любой электронной системы управления агрегатами трансмиссии является преобразователь частоты вращения того или иного вала. При этом входной величиной является угловая скорость вращения вала трансмиссии, а выходным сигналом преобразователя является индуцируемая в нем ЭДС. Обычно применяются преобразователи магнитоэлектрического типа, относящиеся к генераторным преобразователям. Эти преобразователи преобразуют частоту вращения контролируемого вала в частоту и амплитуду ЭДС. Форма выходного сигнала представляет собой деформированную синусоиду (рис. 6.2). Частота изменения этой ЭДС строго пропорциональна частоте вращения контролируемого вала. В большинстве систем управления, содержащих магнитоэлектрический преобразователь частоты вращения вала, в качестве управляющего сигнала

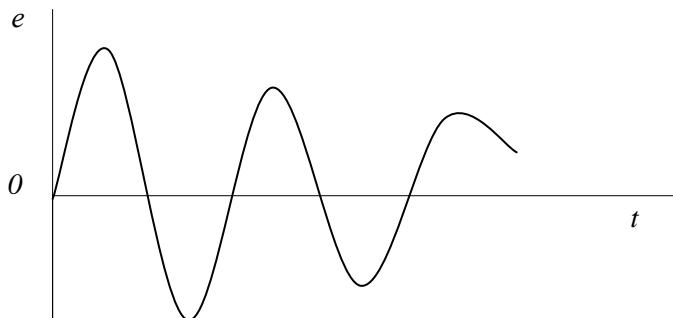
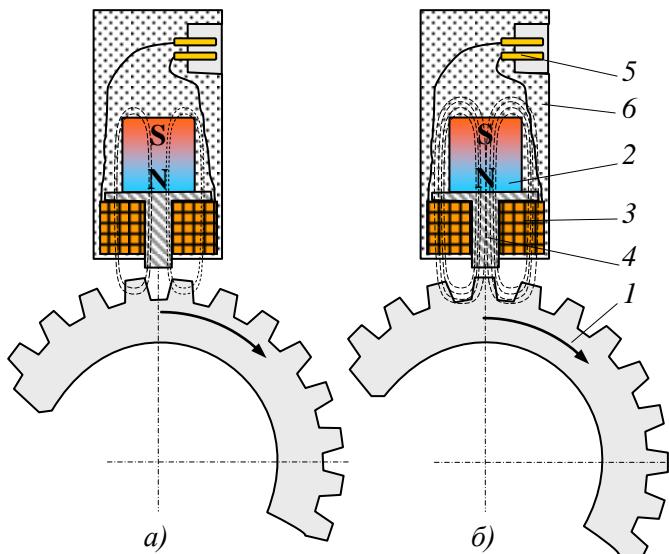


Рис. 6.2. Выходной сигнал преобразователя частоты вращения колеса автомобиля

обычно используется только частота изменения его ЭДС, так как частотно модулированный сигнал является наиболее помехоустойчивым. В качестве преобразователя частоты вращения колеса автомобиля применяется магнитоэлектрический преобразователь пальчикового типа с открытой магнитной цепью.



**Рис. 6.3. Магнитоэлектрический преобразователь частоты вращения вала:** а) магнитная цепь имеет большой воздушный зазор, б) магнитная цепь имеет минимальное магнитное сопротивление: 1- коммутатор магнитного потока – вращающееся зубчатое колесо; 2- постоянный магнит; 3- катушка преобразователя; 4- наконечник – стержень из магнитомягкого материала; 5- выводы обмотки; 6- корпус преобразователя

Преобразователь частоты вращения (рис. 6.3) состоит из чувствительного элемента магнитоэлектрического типа, содержащего постоянный магнит и обмотку, и зубчатого колеса. Чувствительный элемент крепится к неподвижной части устройства, например, на кронштейне подвески автомобиля, корпусе под-

шипника и т.д. Зубчатое колесо устанавливается на ступице контролируемого вращающегося маховика или колеса автомобиля. Работа основана на наведении ЭДС в катушке при изменении магнитного потока из-за изменения магнитного сопротивления магнитной цепи. ЭДС в катушке преобразователя определяется по формулам (6.1) и (6.2).

Достоинством преобразователя является его жесткость, монолитность, отсутствие трущихся элементов и контактов. Недостатком является сложность изготовления, обеспечение соосности всей магнитной системы и необходимость добиваться высокой точности изготовления поверхностей магнита и стержня.

### 6.3. Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлемент – это элемент, выполненный в виде диска, пластины, стержня, цилиндра или любой другой формы, изготовленный из кварца, турмалина, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония, дигидрофосфата калия, титаната бария и его композиций, как ниобата, цирконата-титаната свинца и др. Работа пьезоэлементов основана на использовании пьезоэлектрического эффекта. Различают прямой и обратный пьезоэффекты.

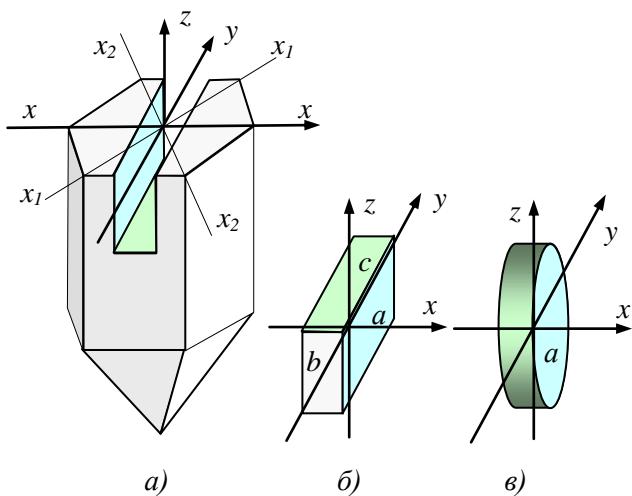
Если при механическом нагружении элемента на одних гранях элемента возникают электрические заряды, то такое поведение кристалла называется прямым пьезоэффектом. Обратный пьезоэффект возникает тогда, когда при наложении электрического поля элемент деформируется механически.

Пьезоэффект оценивается пьезомодулем  $d$ . Он является коэффициентом пропорциональности между возникающим на гранях зарядом и приложенной механической нагрузкой (силий):

$$Q = dP,$$

где  $Q$  – количество заряда, Кл,  $P$  – приложенная сила, Н.

Для получения наибольшего модуля вырезают, например, из монокристалла кварца круглый диск или прямоугольный параллелепипед таким образом, чтобы наибольшая плоскость была перпендикулярна кристаллографической оси. Этую ось условно обозначают через  $x$ .



**Рис. 6.4: а) кристалл кварца; б) пластинка  $x$ -срез; в) диск  $x$ -срез**

Кристалл кварца имеет одну ось симметрии  $z$ , которая называется оптической осью, и три перпендикулярных к ней оси симметрии, образующие между собой углы в  $120^\circ$  (оси  $x-x$ ,  $x_1-x_1$ ,  $x_2-x_2$  – электрические оси).

Если вырезать пластинку, как это показано на рис.6.4 а, б, в, называемой срезом Кюри или  $x$ -срезом, и подвергнуть ее действию силы  $P_x$ , действующей вдоль положительного направления оси  $x$ , то на грани  $a$ , перпендикулярной оси  $x$ , возникает положительный электрический заряд  $+Q$ . На противоположной грани одновременно возникает равный отрицательный заряд  $-Q$ . Величина этих зарядов не зависит от размеров пластинки или диска и однозначно определяется сжимающей или растягивающей силой:

$$Q=d_{11}P_x,$$

где  $d_{11}$  – коэффициент, называемый пьезоэлектрическим модулем.

При замене растяжения сжатием знаки зарядов изменятся на обратные. На других гранях пластинки заряды при этом возникнуть не будут.

Если пластинка растягивается или сжимается вдоль оси  $y$ , то на грани  $a$  возникают заряды, величина которых зависит от соотношения площадей  $a$ , на которых возникает заряд, и грани  $b$ , на которую действует сила:

$$Q = d_{11} \frac{a}{b} P_y.$$

На других гранях заряды не возникают.

Сжатие или растяжение пластиинки вдоль оси  $z$  не вызывает появления зарядов ни на одной из граней.

Для увеличения заряда преобразователь набирают из нескольких пластин, которые механически соединяют последовательно, а электрически – параллельно (рис. 6.5). Для увеличения чувствительности преобразователя его необходимо включить через усилитель постоянного тока. Однако при постоянно действующих силах  $P$  напряжение на входе усилителя со временем будет падать и контролируемая величина силы  $P$  также будет изменяться. Если же увеличить входное сопротивление, то пьезоусилитель будет излишне чувствительным к помехам и его работа становится неустойчивой.

Поэтому, несмотря на принципиальную возможность измерения статических механических нагрузок пьезопреобразователями, применение пьезоусилителей для статических измерений неприемлемы. В связи с этим пьезоэлектрические измерения и контроль целесообразны лишь при динамических процессах.

При обратном пьезоэффекте если пластинку  $x$ -среза поместить в электрическом поле

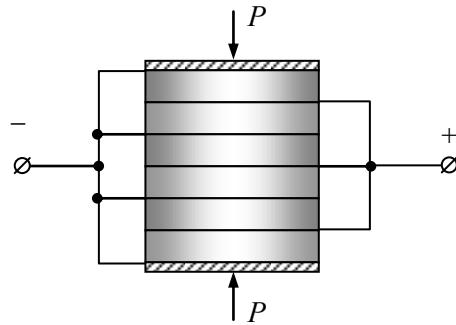


Рис. 6.5. Схема многоэлементного прямого пьезопреобразователя

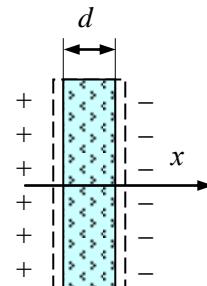


Рис. 6.6. Кварцевая пластинка в электрическом поле

ское поле, пластинка будет деформироваться. При совпадении направления поля с направлением оси  $x$  пластинка расширится вдоль этой оси или наоборот сжимается. Относительное удлинение пластинки вдоль оси  $x$  определяется соотношением:

$$\frac{\delta d}{d} = d_{11} E,$$

где  $E=U/d$  – напряженность электрического поля, в котором находится пластинка (рис. 6.6).

Обратный пьезоэффект используется для получения ультразвуковых волн. В генераторах ультразвуковых волн используются кварцевые пластинки, пластинки из титаната бария и т.д.

Для увеличения интенсивности генерируемого ультразвука пьезоэлектрические пластинки заставляют колебаться с частотой, совпадающей с частотой их собственных колебаний. При работе кварцевого ультразвукового источника излучений на основной резонансной частоте толщину кварцевой пластины можно определить по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda$ - длина звуковой волны в кварце,  $V_{prod} \approx 5720$  м/с,  $V_{nonep} \approx 3515$  м/с. Определим частоту ультразвука, если требуемая длина волны равна  $1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ . Зависимость частоты колебаний от длины волны при известной скорости ультразвука имеет вид:

$$\nu = \frac{V}{\lambda}.$$

Тогда подставляя значение скорости 5720 м/с (скорость звука в кристалле кварца) и  $10^{-3}$  м, получим 5,72 МГц. Толщина кварцевой пластины при этом  $d=0,5$  мм.

На практике в качестве мощного ультразвукового излучателя обычно применяют титанат бария ТБ-1, ЦТС и т.д., так как у них пьезомодуль намного больше кварца.

Двигатели внутреннего сгорания могут быть выведены из строя из-за возникающей при сгорании рабочей смеси детонации.

Более высокие степени сжатия, улучшающие топливную экономичность двигателя, и изменение качества используемого топлива увеличивает склонность двигателя к детонации.

Для контроля детонации используют преобразователи детонации в основном пьезоэлектрические (рис. 6.7). Их размещают в таком месте, которое обеспечивает оптимальное определение детонации во всех цилиндрах двигателя.

Пьезоэлектрический преобразователь состоит из пьезоэлемента 1, помещенного между втулкой крепления 7 и инерционной массой 2. Инерционная масса прижимается к пьезоэлементу под действием плоской пружины 3. Все элементы преобразователя помещены в пластмассовом корпусе 6. Сигналы пьезоэлементов воспринимают латунные фольги 4, соединенные с выводами 5. При возникновении детонации инерционная масса 2 воздействует на пьезоэлемент 1 с соответствующей частотой и усилием. В результате пьезоэффекта появляется переменный сигнал, который передается в блок управления.

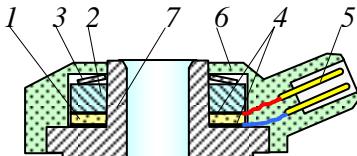


Рис. 6.7. Преобразователь детонации: 1- пьезоэлектрический элемент; 2- инерционная масса; 3- пружина; 4- контакты пьезоэлемента; 5- контактные выводы; 6- пластмассовый корпус; 7- втулка крепления

### Контрольные вопросы

1. Что является выходной величиной магнитоэлектрических преобразователей, если входной величиной является переменный ток?
2. Назовите преимущества и недостатки магнитоэлектрических преобразователей.
3. Что является входной величиной, а что является выходной магнитоэлектрических преобразователей частоты вращения?
4. В каких случаях опасно применение пьезоэлектрических преобразователей?

## 6.4. Сельсины

Для измерения угловых положений валов или углов рас согласования между ними часто применяют сельсины, аналогичные электрическим машинам переменного тока. Обмотки возбуждения могут находиться на статоре либо на роторе. Если обмотку возбуждения выполняют однофазной и располагают на

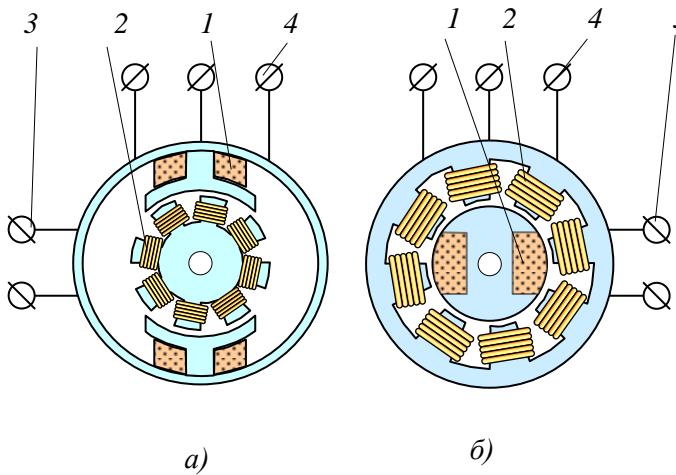
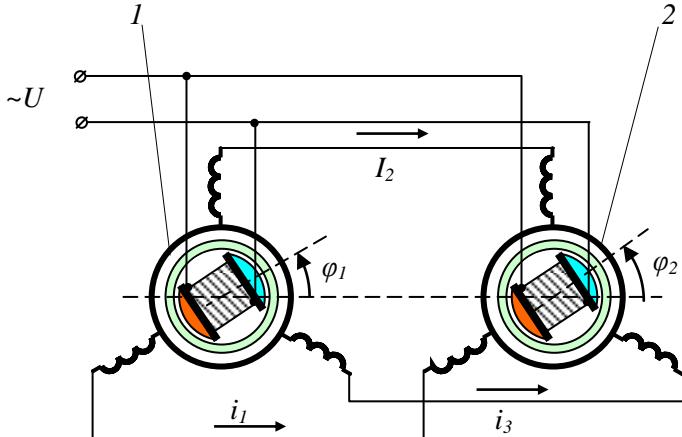


Рис. 6.8. Схемы сельсинов: а) с однофазной обмоткой возбуждения; б) с трехфазной обмоткой возбуждения; 1- обмотка возбуждения; 2- обмотка выходная; 3- выводы обмотки возбуждения; 4- выводы выходных обмоток

статоре, статор выполняют с явно выраженным полюсами (рис. 6.8, а). В этом случае на роторе помещаются три обмотки, соединенные в звезду, причем магнитные оси обмоток сдвинуты между собой на  $120^{\circ}$ . Три конца этих обмоток выводятся на три кольца коллектора. Если обмотку возбуждения выполняют трехфазной и располагают на статоре (рис. 6.8, б), то ротор делают явновыраженным и на него укладывают однофазную обмотку. Эту обмотку присоединяют к двум коллекторным кольцам. Сельсины первого типа имеют большие габариты, но обладают более высокой точностью балансировки ротора, а с явно

выраженным ротором малогабаритны, но имеют большой дисбаланс. В качестве преобразователя угла используется обычно схема, содержащая два одинаковых сельсина: сельсин-преобразователь и сельсин-приемник. Ротор сельсина-преобразователя механически связан с объектом управления



**Рис. 6.9. Схема включения одинаковых сельсинов:**  
1- сельсин - преобразователь; 2- сельсин - приемник

(контроля), обмотки возбуждения включены в общую цепь переменного тока. Статорные обмотки сельсина-преобразователя соединены со статорными обмотками сельсина-приемника (рис. 6.9). При повороте ротора сельсина-преобразователя на угол  $\varphi_1$  в цепях его статора создаются токи  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , которые вызовут магнитный поток статора сельсина-приемника. Взаимодействие этого потока с магнитным потоком ротора сельсина-приемника вызовет врачающий момент  $M_n$ , и ротор сельсина-приемника повернется на угол  $\varphi_2$ . Этот врачающий момент определяется

$$M_n = M_{\max} f(\varphi_1 - \varphi_2) = M_{\max} f(\alpha),$$

где  $M_n$  – врачающий момент, действующий на сельсин-приемник;  $M_{\max}$  – максимальный момент, действующий на ротор приемника;  $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$  – угол рассогласования.

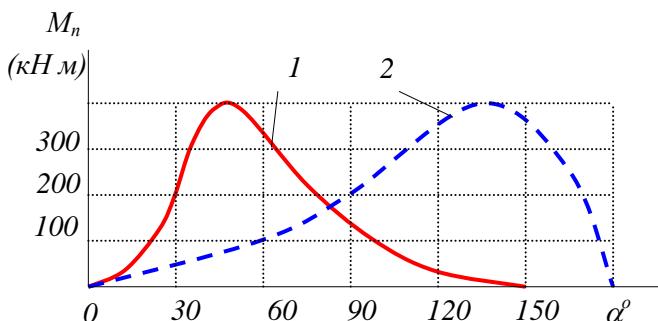
Зависимость  $M_n$  от  $\alpha$  для сельсинов, работающих в силовом режиме, приведена на рис. 6.10. Кривая 1 соответствует с неявно выраженным полюсами, а кривая 2 – с явно выраженным полюсами. Отсюда видно, что при малых  $\alpha$ ,  $M_n$  определяются выражением

$$M_n = M_{max} \alpha.$$

Крутизна характеристики  $S_n$ :

$$S_n = \left. \frac{dM_n}{d\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow 0}.$$

При появлении нагрузки на валу сельсина-приемника об-



**Рис. 6.10. Графики зависимости вращающего момента от угла рассогласования сельсинов: а) с неявно выраженным полюсами; б) с явно выраженным полюсами сельсинов**

разуется угол рассогласования  $\alpha_n$ . Он определяется :

$$\alpha_n = \frac{M_{nn}}{S_{nn}},$$

где  $M_{nn}$  – момент при нагрузке,  $S_{nn}$  – соответствующая крутизна.

При равномерном вращении роторов сельсина-приемника и сельсина-датчика с угловой скоростью  $\omega_1$ , которая мало отличается от угловой частоты, питающей сети  $\omega$ , определим  $M_n$ , при этом учитывая, что  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  переменные. В произвольный момент времени  $\varphi_1 = \varphi_{10} + \omega_{10}t$ . Тогда для установившегося режима запишем:

$$M_{nh} = M_{\max} (\varphi_{10} + \omega_{10} t - \varphi_2).$$

Отсюда:

$$\varphi_{10} + \omega_{10} t - \varphi_2 = \frac{M_{nh}}{M_{\max}}.$$

При малых  $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$        $\alpha = \frac{M_{nh}}{M_{\max}}$ . Из выражения

$\varphi_{10} + \omega_{10} t - \varphi_2 = \alpha$  определим  $\omega_{10}$ . Для этого его продифференцируем и получим:

$$\omega_{10} = \frac{d\alpha}{dt} = \omega_{20}; \varphi_2 = (\varphi_{10} + \omega_{10} t) - \alpha,$$

где  $\omega_{20}$  – угловая скорость сельсин-приемника.

Отработанный угол сельсин-приемника отстает от отработанного угла сельсина-преобразователя на угол  $\alpha$ , когда  $\alpha = 0$ , то сельсин датчик и приемник работают синфазно.

Сельсины могут быть включены в трансформаторную схему.

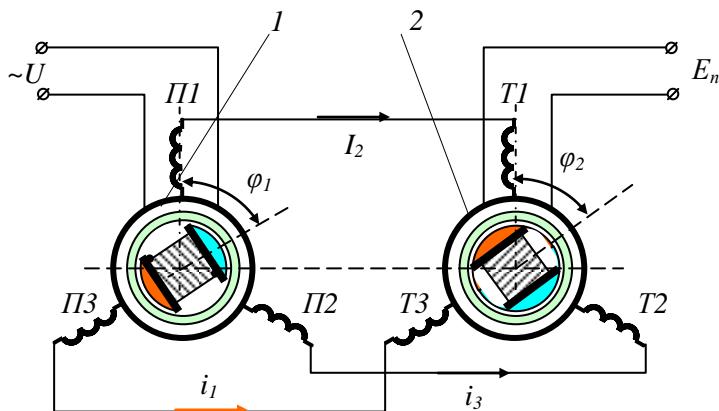
Назначение трансформаторной сельсинной схемы – создавать выходное напряжение, которое по величине и знаку однозначно определяет угол рассогласования между роторами сельсинов. Схема включения показана на рис. 6.11. В обмотке возбуждения приемника ЭДС определяется

$$E_n = E_{\max} \cos \alpha,$$

где  $E$  – ЭДС, индуцируемая в обмотке возбуждения сельсин-приемника;  $E_{\max}$  – максимальное значение индуцируемой ЭДС при согласованном (синхронном) положении роторов сельсинов, т.е.  $\alpha = 0$ .

Если закрепить неподвижно ротор сельсин-приемника (сельсин-трансформатора), то индуцируемая ЭДС будет пропорциональна углу поворота ротора сельсин-преобразователя:

$$E_n = E_{\max} \cos \alpha.$$



**Рис. 6.11. Схема включения сельсинов в трансформаторную схему: 1- сельсин-преобразователь; 2- сельсин - трансформатор**

Если учесть, что  $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$ , то  $E_n = E_{max} \cos \varphi$  при фиксированном роторе сельсин-приемника. Эта характеристика нереверсивная, нелинейная, крутизна при малых поворотах низкая. Поэтому за согласованное положение принимают такое положение, когда их роторы смещены на  $90^\circ$ . Тогда  $E_n = E_{max} \cos(90^\circ - \varphi_1) = -E_{max} \sin \varphi_1$ . При этом характеристика стала реверсивной, при изменении направления поворота ротора сельсин-преобразователя от согласованного положения фаза индуцируемой ЭДС изменяется на  $180^\circ$ . Эта характеристика становится линейной при небольших углах поворота угла ротора преобразователя, т.к. при малых углах  $\sin \varphi_1 \approx \varphi_1$ . Тогда  $E_n = E_{max} \varphi_1$ , чувствительность максимальная, а напряжение  $E_n$  при согласованном положении, т.е. при  $\alpha = 0$  равно нулю,  $E_n = E_{max} \cdot 0 = 0$ .

#### Контрольные вопросы

1. Что является входной величиной сельсинов?
2. Что является выходной величиной сельсинов при различных режимах работы?
3. Какой источник применяется для питания сельсинов?

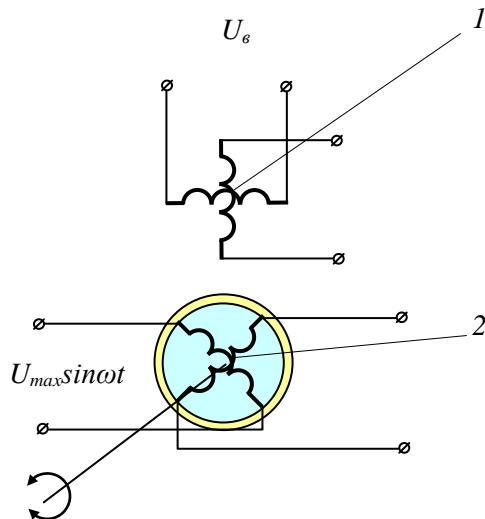
## 6.5. Вращающиеся трансформаторы

На статоре и роторе вращающегося трансформатора размещается по две распределенных обмотки, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны. Статор обычно закрепляется неподвижно, а роторы механически соединяются с подвижной частью объекта управления. Поворот ротора преобразуется в электрический сигнал. Работа основана на изменении коэффициентов взаимоиндукции между обмотками статора и ротора при повороте ротора. Взаимоиндукция соответствует закону синуса и косинуса, поэтому их иногда называют синусно – косинусными вращающимися трансформаторами (СКВТ). Когда эта зависимость линейная, называются линейными вращающимися трансформаторами (ЛВТ). Режим работы в зависимости от схемы включения может быть амплитудным или фазовращательным.

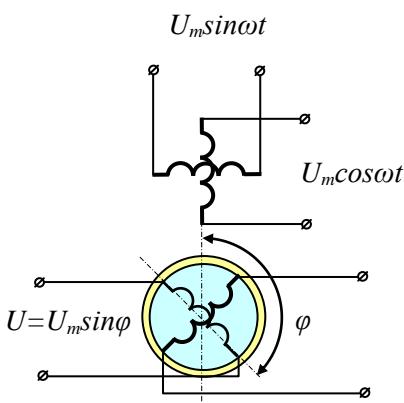
В амплитудном режиме (рис. 6.12) на одну из обмоток ротора или статора подается постоянное по амплитуде переменное напряжение возбуждения  $U = U_{max} \sin \omega t$ . Магнитный поток этой обмотки индуцирует в обмотках статора ЭДС, пропорциональные синусу или косинусу угла поворота ротора (рис. 6.13):

$$E_1 = E_m \sin \varphi$$

$$E_2 = E_m \cos \varphi,$$



**Рис. 6.12. Схема включения синусно – косинусного вращающегося трансформатора в амплитудный режим: 1- обмотки статора; 2- обмотки ротора**



**Рис. 6.13. Схема включения синусно – косинусного вращающегося трансформатора в режим фазовращателя**

также используют СКТВ. При этом обе статорные обмотки включаются в систему двух питающих напряжений со сдвигом фаз  $90^\circ$ :

$$\begin{aligned}U_1 &= U_m \sin \omega t \\U_2 &= U_m \cos \omega t.\end{aligned}$$

Тогда вокруг ротора возникает вращающееся магнитное поле с угловой частотой  $\omega$ . В обмотках ротора индуцируется ЭДС с такой же частотой  $\omega$ , но сдвинутой по фазе на угол  $\alpha$  относительно фазы питающего напряжения. Этот угол зависит от угла поворота ротора относительно статора. Напряжения, снимаемые с обмоток ротора, будут:

$$\begin{aligned}U_1 &= U_m \sin(\omega t + \alpha) \\U_2 &= U_m \cos(\omega t + \alpha).\end{aligned}$$

Такое устройство преобразует угол поворота в фазовый угол синусоидального напряжения. Несмотря на сложность схемы, она более помехоустойчива, чем амплитудная.

## 6.6. Индукционный редуктор

Представляет собой бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор с электрической редукцией. Ст-

где:  $E_1$ ,  $E_2$  – действующие значения ЭДС в обмотках статора;  $E_m$  – максимальное значение ЭДС в обмотках статора, когда оси этих обмоток совпадают с осью обмотки ротора.

При использовании СКТВ в качестве преобразователя угла напряжение снимают только с синусной обмотки. В этом случае статическая характеристика преобразователя получается реверсивной и линейной в диапазоне  $\pm 14^\circ$ . В режиме фазовращателя тоже используют СКТВ. При этом обе статорные обмотки включаются в систему двух питающих напряжений со сдвигом фаз  $90^\circ$ :

$$\begin{aligned}U_1 &= U_m \sin \omega t \\U_2 &= U_m \cos \omega t.\end{aligned}$$

Тогда вокруг ротора возникает вращающееся магнитное поле с угловой частотой  $\omega$ . В обмотках ротора индуцируется ЭДС с такой же частотой  $\omega$ , но сдвинутой по фазе на угол  $\alpha$  относительно фазы питающего напряжения. Этот угол зависит от угла поворота ротора относительно статора. Напряжения, снимаемые с обмоток ротора, будут:

$$\begin{aligned}U_1 &= U_m \sin(\omega t + \alpha) \\U_2 &= U_m \cos(\omega t + \alpha).\end{aligned}$$

Такое устройство преобразует угол поворота в фазовый угол синусоидального напряжения. Несмотря на сложность схемы, она более помехоустойчива, чем амплитудная.

тор и ротор набраны из листовой электротехнической стали. Внутренняя поверхность статора и наружная поверхность ротора содержат большое число зубьев. Отношение числа зубьев статора к числу зубцов ротора обычно составляет 4/3 или 4/5. На каждом зубце статора намотана первичная обмотка (обмотка возбуждения), а две вторичные обмотки намотаны через зубец, как показано на рис. 6.14. Первичная обмотка питается переменным синусоидальным напряжением. В зависимости от положения ротора во вторичных обмотках индуцируется ЭДС. Амплитуды этой ЭДС в обмотках изменяются в функции угла поворота ротора с пространственным сдвигом в  $90^\circ$  или  $1/4$  зубцового деления ротора. Поворот ротора на один зубец соответствует полному периоду изменения амплитуды напряжения на выходе. Поэтому напряжение на выходе редуктосина определяется

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых},m} \cos z_p \varphi,$$

где  $U_{\text{вых},m}$  – максимальное выходное напряжение при  $\varphi=0$ ;  $z$  – число зубцов ротора;  $\varphi$  – угол поворота ротора.

Обычно коэффициент редукции принимается равным  $2^n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ), то есть 32, 64....

Индукционные редуктосины отличаются надежностью, долговечностью и высокой точностью. Например, при коэффициенте редукции 32 погрешность не превышает  $1'$ .

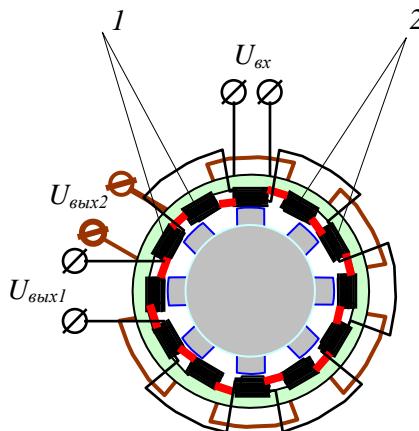
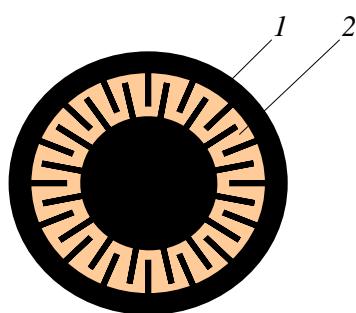


Рис. 6.14. Схема индукционного редуктосина: 1- первичная обмотка; 2- вторичные обмотки

## 6.7. Индуктосины

Чаще применяются поворотные индуктосины. Ротор и статор такого индуктосина представляют собой плоские диски из диэлектрического материала, на которые нанесены печатные обмотки. Диски расположены между собой соосно и могут поворачиваться относительно друг друга. Вид обмотки представлен на рис. 6.15. Обычно на роторе располагают однофазную многополюсную обмотку. На статоре – двухфазную многополюсную секционную обмотку и сдвинутые относительно друг друга на половину полюсного деления ротора. Индуктосины работают в двух режимах в зависимости от способа питания. Когда обмотки статора питаются переменным напряжением с одинаковыми фазами, а амплитуды изменяются по закону синуса и косинуса, получается амплитудный режим. При питании обмоток статора напряжением равной амплитуды, но сдвинутым по фазе на  $90^\circ$ , считается, что индуктосин работает в фазовом режиме. При этом возникает вращающееся магнитное поле ста-



**Рис. 6.15. Схема обмотки индуктосина: 1- диэлектрический диск; 2- обмотка, нанесенная на диэлектрический диск**

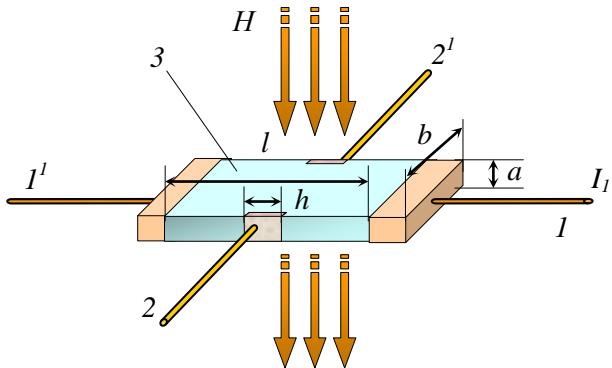
тора. Отсчет угла поворота ротора осуществляется по фазе напряжения обмотки ротора. Частота питающегося напряжения выбирается в диапазоне 10-100 кГц, т.к. индуктосины по принципу действия относятся к воздушным трансформаторам. Коэффициент передачи индуктосина составляет  $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ . К достоинствам относятся высокая точность  $\pm (5 \div 10)''$ , малый момент и инерционность, малая масса и размеры. К

недостаткам можно отнести сложность изготовления и малое значение выходного сигнала. Чаще применяют в системах управления станков с ЧПУ и роботов.

## 6.8. Преобразователь Холла

В основе работы гальваномагнитных преобразователей лежат гальваномагнитные явления, которые возникают в электропроводных телях, если эти тела поместить в магнитное поле и пропустить через них электрический ток. Для измерительных целей используются в основном два гальваномагнитных явления: эффект Холла и эффект магнитосопротивления (см. параграф 4.4).

Первый из них заключается в возникновении в точках 2 –



**Рис. 6.16. Схема преобразователя Холла: 1- токовые электроды; 2- сигнальные электроды (выходные); 3- магниточувствительный элемент Холла**

$2^l$  пластины (рис. 6.16), помещенной в магнитное поле с индукцией  $B$ , разности потенциалов  $U_{20}$ , если через нее протекает ток  $I_1$ .

Преобразователь, основанный на использовании эффекта Холла, получил название датчика Холла. Величина электродвижущей силы (ЭДС) Холла между точками  $2 - 2^l$  в отсутствие нагрузки определяется соотношением

$$U_{20} = k \frac{R_x}{a} I_1 B = \gamma I_1 B,$$

где  $I_1$  – управляющий ток, протекающий вдоль пластины, А;  $k$  – коэффициент, зависящий от размеров пластины и электродов, в частности, от отношения  $b/a$  и  $h/l$  ( $h$  – ширина холловских электродов);  $a$  – толщина пластины, м;  $R_x$  – постоянная Холла, являющаяся характеристикой полупроводникового материала, м<sup>3</sup>/А·с;  $B$  – индукция магнитного поля, Т.

ЭДС Холла пропорциональна произведению  $I_1B$  и некоторому параметру  $\gamma = kR_x/a$ , зависящему от свойства материала и конструкции элемента, получившему название чувствительности датчика Холла.

При нагружении датчика Холла конечным сопротивлением  $R$  напряжение на электродах 2 – 2<sup>1</sup> уменьшится и будет равно:

$$U_2 = \frac{\gamma}{R_{\text{вых}}} I_1 B, \\ 1 + \frac{R_{\text{вых}}}{R}$$

где  $R_{\text{вых}}$  – выходное сопротивление датчика (сопротивление между холловскими электродами при отсутствии магнитного поля).

Наряду с чувствительностью  $\gamma$  и выходным сопротивлением  $R_{\text{вых}}$  к характеристикам датчика, используемым при расчетах схем, относятся входное сопротивление, номинальное значение управляющего тока и напряжение неэквивалентности (остаточное напряжение).

Входным сопротивлением датчика Холла  $R_{\text{вх}}$  называется сопротивление между токовыми электродами датчика 1 – 1<sup>1</sup> при отсутствии магнитного поля.

За номинальное значение управляющего тока принимается ток, при котором происходит заметное изменение наклона характеристики  $U_{20}=f(I_1)$  при максимальной величине магнитной индукции и отсутствии теплоотвода. При улучшении теплоотвода управляющий ток (а с ним и выходной сигнал) могут быть существенно увеличены, пока не будет превышена допустимая для элемента температура.

Напряжение неэквивалентности – напряжение, которое возникает на холловских электродах относительно прямой, перпендикулярной линиям управляющего тока, в результате чего

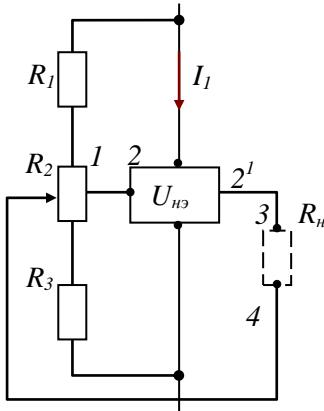
электроды не оказываются на эквипотенциальной линии. Заметно, что напряжение неэквивалентности является помехой для полезного сигнала и потому должно быть уменьшено либо подбором элементов, либо схемным путем. Одна из распространенных схем компенсации остаточного напряжения приведена на рис. 6.17.

На схеме сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_3$  в несколько сот раз превосходят выходное сопротивление датчика, а сопротивление резистора  $R_2$  (с отводом от середины) - такого же порядка, что и выходное сопротивление. Кроме того, сопротивление резистора  $R_3$  берется на 20 – 25% больше, чем  $R_1$ . Компенсация напряжения неэквивалентности осуществляется следующим образом. Между точками 1 и 2 включают чувствительный индикатор тока и с помощью резистора  $R_3$  производят уравновешивание потенциалов между ними; затем перемещением движка резистора  $R_2$  добиваются отсутствия остаточного напряжения между точками 3 и 4.

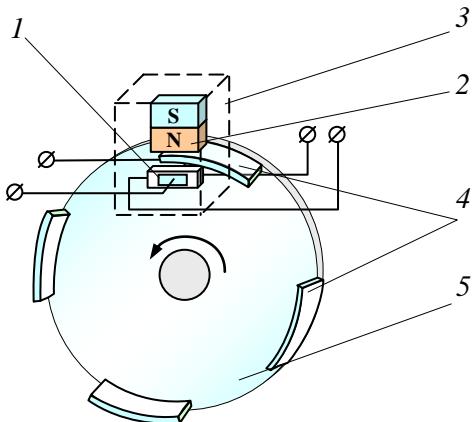
Для датчиков Холла используют германий, кремний, арсенид галлия, арсенид индия и т.д. Преобразователи из германия и кремния имеют большую чувствительность, чем с интерметаллическими материалами (арсенид индия, арсенид-фосфид индия), но весьма восприимчивы к изменению режима работы, вследствие чего требования к параметрам схемы, в которой работает датчик, приходится ужесточать.

Несмотря на некоторые недостатки, преобразователи с датчиками Холла оказываются в ряде случаев проще и дешевле.

Чувствительность этих преобразователей от 0,6 до 35 В/А·Т, максимальный управляемый ток до 350 мА, входное сопротивление от 0,5 до 200 Ом, выходное – от 0,5 до 350 Ом.



**Рис. 6.17. Схема компенсации остаточного напряжения на преобразователе**

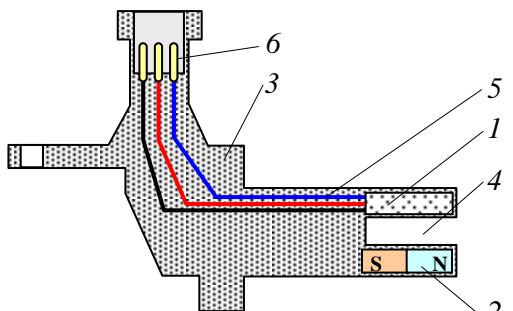


**Рис. 6.18. Схема установки датчика Холла в системе распределения зажигания: 1- преобразователь Холла; 2- постоянный магнит; 3- корпус датчика Холла; 4- ферромагнитный экран; 5- диск распределительного вала двигателя**

Размеры – до  $12 \times 6 \times 0,25$  мм, диапазон рабочих температур от  $-96$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 6.18 представлена схема работы датчика Холла в системе зажигания основных легковых автомобилей. Преобразователь Холла 1 и постоянный магнит установлены в одном

пластмассовом корпусе 3, образуя самостоятельный законченный преобразователь Холла. Взаимодействие постоянного магнита прекращается при прохождении ферромагнитного экрана 4, расположенного на диске 5 распределительного вала двигателя. В про-



**Рис. 6.19. Схема датчика фазы в системе распределения зажигания: 1- преобразователь Холла; 2- постоянный магнит; 3- корпус; 4- прорезь; 5- провода питания и сигнала; 6- разъем**

межутках между ферромагнитными экранами преобразователь Холла 1 окажется под воздействием постоянного магнита и на выходных зажимах преобразователя появляется ЭДС. Число ферромагнитных экранов должно соответствовать количеству цилиндров двигателя.

На рис. 6.19 показана схема датчика фазы в системе распределения зажигания легковых автомобилей семейства ВАЗ последних моделей. Назначение и принцип работы аналогичны датчикам Холла, установленным на автомобилях ВАЗ-21083 – 21099 и ВАЗ-11113 ОКА.

## 6.9. Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенераторы применяются для преобразования частоты вращения вращающихся частей объекта управления в электрический сигнал. Они представляют собой маломощную электрическую машину постоянного или переменного тока.

Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции.

Тахогенератор постоянного тока состоит из неподвижного статора и подвижного якоря (рис. 6.20). Магнитный поток  $\Phi$  (на рисунке не показано) создается постоянным магнитом или электромагнитом. Якорь имеет обмотку 2, которая запрессована в стенки пустотелого пластмассового цилиндра 3. В некоторых конструкциях сердечник набирается из листовой стали и в пазы укладывается обмотка. При вращении якоря в его обмотке индуцирует-

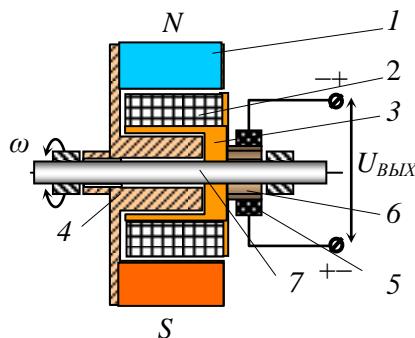


Рис. 6.20. Схема тахогенератора постоянного тока: 1 – постоянный магнит статора; 2 – обмотка якоря; 3 – пластмассовый цилиндр якоря; 4 – корпус статора; 5 – щетки якоря; 6 – коллектор якоря; 7 – вал якоря

ся ЭДС:

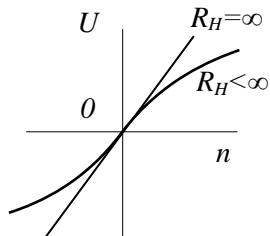
$$E = \kappa \Phi n = \frac{P w 10^{-8}}{2\pi\alpha} \Phi n,$$

где  $E$  – ЭДС,  $\Phi$  – магнитный поток,  $n$  – число оборотов якоря,  $P$  – число пар полюсов,  $w$  – число витков в обмотке,  $2a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Эта зависимость справедлива только в режиме холостого хода, т.е. при сопротивлении нагрузки  $R_h = \infty$ . При наличии нагрузки с  $R_h << \infty$  на нагрузке падение напряжения будет

$$U_{\text{вых}} = E - I_h R_a,$$

где  $U_{\text{вых}}$  – падение напряжения на нагрузке,  $I_h$  – ток на нагрузке,  $R_a$  – активное сопротивление обмотки якоря.



**Рис. 6.21. Характеристика тахогенератора постоянного тока**

ры, помехи для радиоаппаратуры. При частоте вращения якоря, близкой к нулю, возникает зона нечувствительности. На рис. 6.21 приведена характеристика тахогенератора постоянного тока.

## 6.10. Синхронные тахогенераторы

У синхронных тахогенераторов магнитный поток создается постоянным магнитом, установленным на вращающемся валу. Неподвижный статор содержит однофазную или трехфазную обмотку. При вращении ротора в обмотках статора индуцируется переменная ЭДС синусоидальной формы. Схема и статическая характеристика синхронного тахогенератора представлена на рис. 6.22, а, б соответственно. При изменении частоты враще-

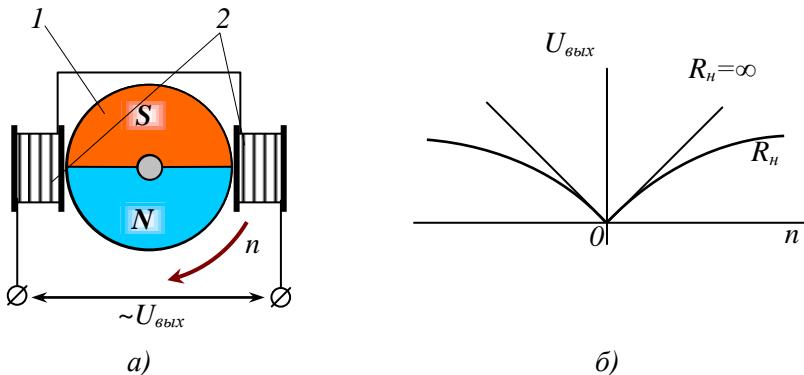


Рис. 6.22. Синхронный тахогенератор: а) схема; б) статическая характеристика: 1- ротор; 2- обмотки статора

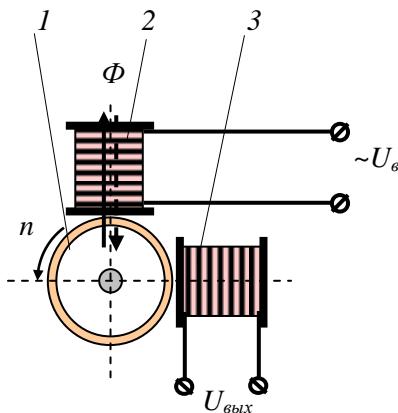
ния ротора изменяются одновременно и частота, и амплитуда ЭДС. Значение ЭДС в обмотке статора определяют по формуле:

$$E = 4.44k_w \frac{Pn}{60W\Phi}.$$

К преимуществам относится высокий уровень выходного напряжения, надежность, линейность характеристики, возможность передачи сигнала на расстояния в виде частотной модуляции. К недостаткам можно отнести сравнительно большой момент инерции ротора, нереверсивность характеристики, чувствительность к влиянию температуры окружающей среды.

## 6.11. Асинхронные тахогенераторы

Конструктивно напоминают двухфазный асинхронный двигатель с тонкостенным ротором. На статоре расположены две обмотки: поперечная и продольная, магнитные оси которых смешены в пространстве по отношению друг к другу на  $90^0$ , как показано на рис. 6.23. Ротор представляет собой пустотный цилиндр (стаканчик) 1 из немагнитного металла, обычно из сплава алюминия. Одна из обмоток 2 статора является обмоткой возбуждения и включается в сеть переменного тока, а другая 3 –



**Рис. 6.23. Схема асинхронного тахогенератора с тонкостенным ротором: 1- тонкостенный полый ротор; 2- обмотка возбуждения; 3- сигнальная обмотка**

выходной или сигнальной обмоткой. При отсутствии вращения ротора ЭДС в сигнальной обмотке не индуцируется, так как направление магнитного потока обмотки возбуждения перпендикулярно оси сигнальной обмотки 5. При вращении ротора с угловой скоростью  $\omega$  в роторе индуцируется ЭДС, пропорциональная магнитному потоку возбуждения  $\Phi$  и угловой скорости ротора  $\omega$ :

$$E_p = -k\Phi B_B \omega = -kB_B S V/r,$$

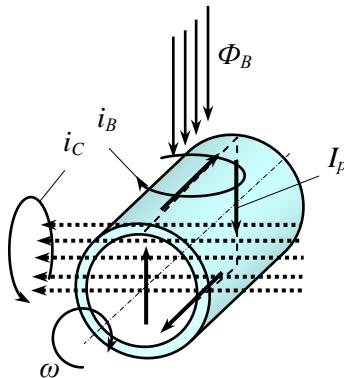
где  $k$  – коэффициент зависит от конструкции;  $B_B$  – индукция обмотки возбуждения;  $S$  – площадь сердечника сигнальной обмотки;  $\omega$  – угловая скорость.

Под действием этой  $E_p$  в роторе возникает ток  $i_p$  по цилиндрической поверхности ротора. Этот ток  $i_p$  в свою очередь создает магнитный поток  $\Phi_p$  с частотой тока обмотки возбуждения и сдвинутый относительно магнитного потока  $\Phi_B$  на  $90^\circ$ . Направление  $\Phi_p$  совпадает с осью выходной обмотки. В выходной обмотке под действием  $\Phi_p$  возникает ЭДС:

$$E_{вых} = k_c U_B \omega ,$$

где  $k_c$  – коэффициент, зависящий от конструкции тахогенератора;  $\omega$  - угловая скорость;  $U_B$  – напряжение питания обмотки возбуждения. Этот процесс показан на рис. 6.24.

Фаза ЭДС сигнальной обмотки, при изменении направления вращения ротора на противоположное, изменяется на  $180^\circ$ .



**Рис. 6.24. Принцип работы асинхронного тахогенератора с полым ротором**

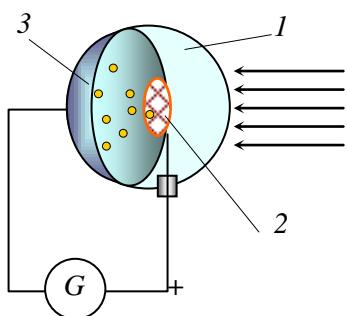
Поэтому статическая характеристика линейная и реверсивная. Достоинства – линейность и реверсивность статической характеристики, высокий уровень выходного сигнала, малый момент инерции ротора, высокая надежность и долговечность. Недостатки – необходимость в источнике питания для обмотки возбуждения и влияние окружающей температуры на полый ротор и обмотки статора.

### Контрольные вопросы

1. Что является выходной величиной датчиков Холла?
2. Назовите преимущества и недостатки датчиков Холла.
3. Что является входной величиной, а что является выходной генераторных преобразователей постоянного тока, синхронного и асинхронного?
4. В каких случаях опасно применение генераторных преобразователей постоянного тока?
5. Перечислите преимущества асинхронных тахогенераторов.

## 6.12. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

По принципу действия фотоэлементы разделяются на два типа: фотоэлементы, использующие явление внешнего фотоэффекта, и фотоэлементы, использующие явление внутреннего фотоэффекта. В первых приборах, которые относятся к типу электровакуумных фотоэлементов (электронных и ионных), под действием света возникает фотоэлектронная эмиссия. Во вторых приборах под действием света либо изменяется проводимость, либо возбуждается собственная электродвижущая сила, и их относят к типу полупроводниковых фотоэлементов.



Внешний фотоэффект основан на законах:  
1) фотоэлектрический ток насыщения  $I_{нас}$  прямо пропорционален световому потоку  $\Phi$ :

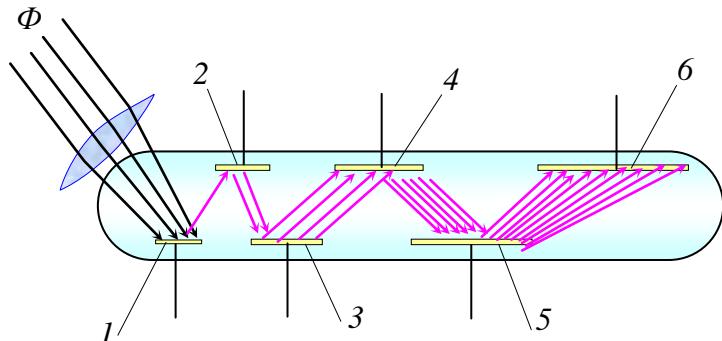
$$I_{нас} = \kappa \Phi,$$

где  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности; 2) скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты  $v$  падающего света и не зависит от его интенсивности; 3) фотоэффект независимо от интенсивности падающего

света начинается только при определенной минимальной для данного материала частоте света  $v_{min}$ . Эта минимальная частота, при которой начинается внешний фотоэффект в данном материале, называется порогом или красной границей фотоэффекта.

На рис. 6.25 изображен фотоэлемент с внешним фотоэффектом, представляющий собой стеклянный баллон 1, в котором создан высокий вакуум. Анодом 2 является сетка, соединенная с положительным полюсом батареи, катодом 3 служит слой активного вещества, нанесенный с внутренней стороны баллона. Иногда слой активного вещества наносится не непосредственно

на стекло баллона фотоэлемента, а на тонкую пленку тугоплавкого металла. Под действием света из активного вещества вырываются электроны, они притягиваются к аноду и цепь замыкается.



**Рис. 6.26. Схема фотоумножителя: 1- фотокатод; 2- первый эмиттер; 3-6- эмиттеры;**

Некоторые фотоэлементы специально изготовлены так, что они могут работать только под действием ультрафиолетовых лучей. Так как обыкновенное стекло не пропускает ультрафиолетовых лучей, то в фотоэлементах, которые работают под действием этих лучей, в стеклянном баллоне устраивается особое окошко из кварцевого стекла. Через него ультрафиолетовые лучи могут свободно проникать внутрь баллона.

В ионных приборах, наполненных инертным газом (гелием, неоном, аргоном и т.д.), ток фотоэлектронной эмиссии возрастает в результате ионизации газа.

К этому типу приборов также относятся фотоэлектронные умножители (рис. 6.26), в которых используется фотоэлектронная и вторично-электронная эмиссия. Под действием света фотокатод 1 эмиттирует электроны, которые падают на первый эмиттер 2 и выбиваются из него вторичные электроны. Эти электроны в свою очередь падают на второй эмиттер 3 и выбиваются из его поверхности вторичные электроны. Одним электроном выбивается примерно 8 – 12 вторичных электронов. Поэтому ток в нагрузке во много раз больше тока фотокатода.

## 6.13. Полупроводниковые фотоэлементы

Фотогальванические приемники излучения относятся к большой группе приборов, чувствительный элемент которых содержит один *p-n* переход. Они предназначаются для преобразования энергии светового излучения в электрическую. Принцип действия основан на разделении носителей зарядов электрическим полем перехода. Для изготовления применяются кремний, германий, селен и т.д.

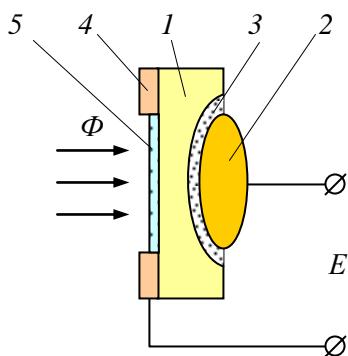


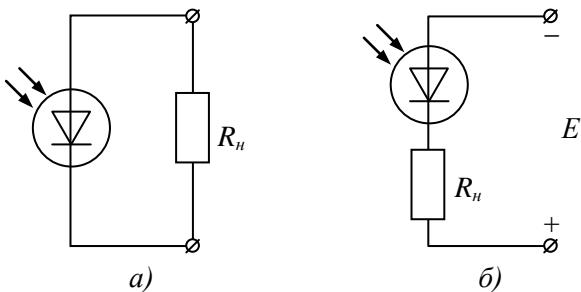
Рис. 6.27. Схема фотоэлемента: 1-кремниевая пластина *n*-типа; 2-таблетка с *p* проводимостью; 3- *p-n* переход; 4- токосъемная пластина; 5- прозрачное окно

от механических и химических внешних воздействий.

Обычно применяется конструкционное исполнение, когда поток излучения освещает только одну часть кристалла. Большая эффективность использования потока излучения достигается при меньшей толщине освещаемого слоя кристалла.

Фотоэлементы, предназначенные для преобразования энергии мощных излучений, например, излучения Солнца, в электрическую энергию, работают в фотогальваническом режиме, без внешнего источника тока (рис. 6.28, а). Преобразователи, предназначенные для работы при слабых излучениях света, например, в измерительных устройствах, работают в фотодиодном режиме с внешним источником тока (рис. 6.28, б). Они называются фотодиодами.

Устройство фотоэлементов (фотодиода) показано на рис. 6.27. С кремниевой пластиной *n*-типа сплавлена таблетка с *p*-проводимостью. Между ними образован *p-n* переход. К обеим частям кристалла присоединены проводниковые выводы. На корпусе имеется прозрачное окно для защиты кристалла



**Рис. 6.28. Схемы включений фотоэлементов: а) в режиме силового фотогальванического преобразователя; б) в режиме фотодиода**

Работа фотогальванических преобразователей основана на использовании процесса ионизации атомов при оптическом облучении. Интенсивность ионизации зависит от энергии световых квантов – фотонов, силы их потока и внутренней энергии вещества, определяемой спектром поглощения.

При отсутствии освещения диффузионный и дрейфовый токи  $p$ - $n$  перехода уравновешиваются. Через этот переход проходит только ток утечки, определяемый по формуле:

$$I_y = I_0 (e^{\frac{qU_x}{kT}} - 1),$$

где  $I_0$  – обратный ток;  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $U_x$  – напряжение холостого хода на слоях  $p$ - $n$  перехода;  $k = 8,75 \cdot 10^{-5}$  эВ – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура кристалла.

При облучении атомы полупроводника генерируют пары электрон-дырка. На контактах  $p$  и  $n$  областей возникает ЭДС. При наличии сопротивления  $R_h$  в цепи ток  $I$  определяется по формуле:

$$I = I_\phi - I_0 (e^{\frac{qU_x}{kT}} - 1).$$

Силовые фотоэлементы применяются в солнечных преобразователях, а фотодиоды – в приборах автоматики. Батарея

площадью 1 м<sup>2</sup> может развивать полезную мощность до 100-150 Вт при КПД 10-15%. Силовые фотоэлементы обладают значительной инерционностью из-за большой собственной емкости, образованной активным полупроводниковым слоем и электродами. Фотодиоды малоинерционны, и поэтому они хорошо реагируют на сигналы, частота которых доходит до 100 кГц.

Таблица 6.1

Тип элемента	Чувствительность		$U_{раб}$ (В)	Элем. актив. слоя	Площ. акт. слоя см <sup>2</sup>
	Спектральная $S_\lambda$ , мкм	Интегр. $S_{штт}$ , лм <sup>-1</sup>			
<i>Силовые солнечные фотоэлементы</i>					
К-20	0,56	0,6	0,2	Se	20
ФЭССУ-10	0,6-1,1	8,0	0,15	Ag <sub>2</sub> S	10
<i>Фотодиоды</i>					
ФД-3	0.7-1.1	30	10	Ge	10 <sup>-2</sup>
ФД-9К	0.9	7.0	10	Si	-

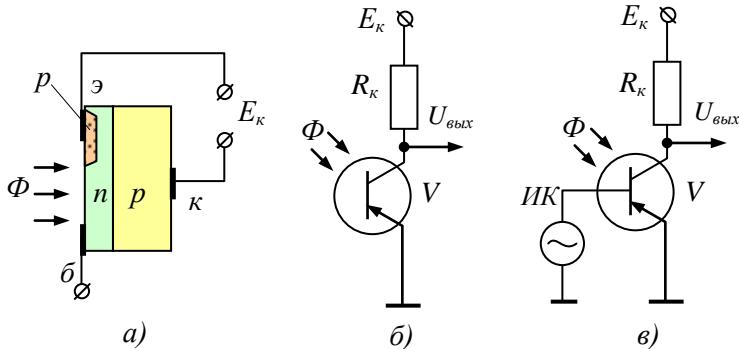
Параметры некоторых фотоэлементов приведены в таблице 6.1.

## 6.14. Фототранзисторы

Фототранзистором называется фотоэлемент (фотогальванический преобразователь) с двумя *p-n* переходами, предназначенный для преобразования потока излучения в электрический сигнал. Они применяются в качестве преобразователей в автоматических устройствах.

Схема фототранзистора приведена на рис. 6.29, *a*. В кристалле *p-n-p* структуры образованы два перехода; базовый *n*-слой – очень тонкий; кристалл помещается в корпусе с окном для пропуска света. Он включается в цепь как диод с одним свободным электродом (рис. 6.29, *б*) или как обычный транзистор (рис. 6.29, *в*).

Принцип работы фототранзистора при отключенной базе состоит в следующем: коллекторный переход смещен в обратном, а эмиттерный переход – в прямом направлении. При освещении в области базы возникают электронная и дырочная проводимости, отчего изменяется потенциал эмиттерного перехода.



**Рис. 6.29. Фототранзистор:** *а)* схема фототранзистора; *б)* схема включения как диода; *в)* как обычного транзистора

Неосновные носители, инжектированные из эмиттера в базу, перебрасываются электрическим полем через коллекторный переход. Коллекторный ток  $I_k$  при  $I_b=0$  почти равен току эмиттера:

$$I_k = \beta I_\phi - I_m,$$

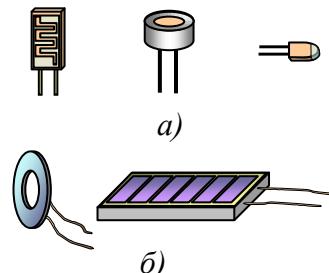
где  $\beta$ - коэффициент передачи тока базы;  $I_m$ - темновой ток, равный обратному току  $I_{kб0}$  затемненного перехода;  $I_\phi=k\Phi$ - фототок транзистора.

Отсюда следует, что интегральная чувствительность фототранзистора в  $\beta$  раз больше интегральной чувствительности фотодиода, т.е. фототранзистор обладает свойством усиливать сигналы.

На рис.6.30 приведены виды некоторых фотосопротивлений и фотоэлементов.

#### Контрольные вопросы

1. Работа каких фотопреобразователей основана на внешнем, а какие на внутреннем фотоэффектах?
2. Почему фоторезисторы можно применять в цепях как постоянного, так и переменного токов?
3. Дайте сравнительную оценку вариантов схем включения фотодиодов и фототранзисторов.



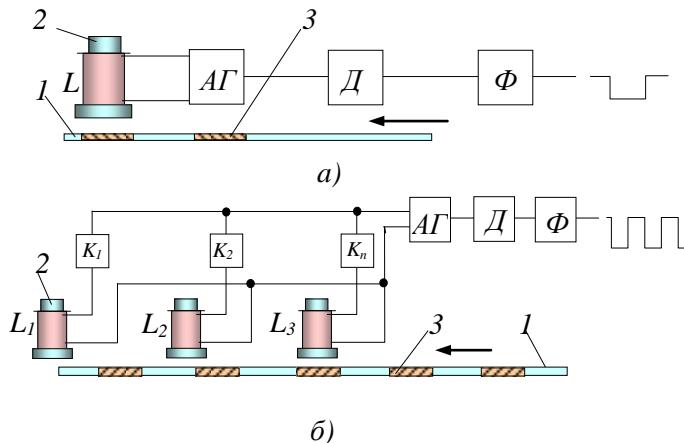
**Рис. 6.30. Фотопреобразователи:** *а)* фотосопротивления; *б)* фотоэлементы

## ГЛАВА 7. Дискретные преобразователи

### 7.1. Дискретные электронные преобразователи с индуктивным чувствительным элементом

Для преобразования неэлектрических величин, например, угловых и линейных перемещений (скоростей) успешно применяются дискретные преобразователи. Используется принцип срыва генерации автоколебаний при взаимодействии металлического тела и катушки индуктивности LC-автогенератора, которые называются автогенераторными преобразователями. Они состоят из LC-автогенератора, детектора и усилителя – формирователя прямоугольных импульсов, чувствительного и задающего элементы.

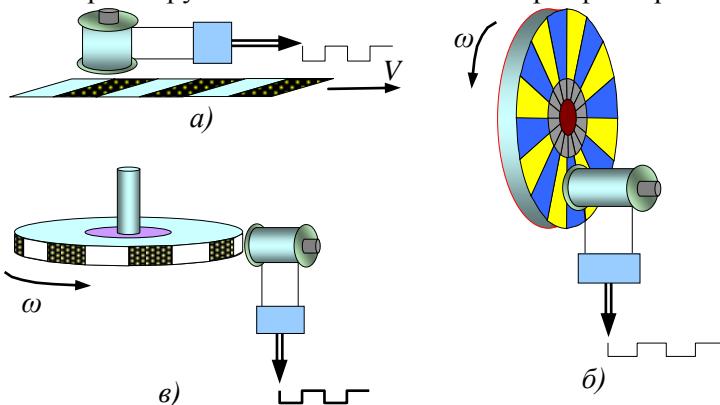
По числу чувствительных элементов автогенераторные дискретные преобразователи разделяют на одноэлементные и многоэлементные. Одноэлементные могут быть сигнализаторами заданной величины и измерительными преобразователями



**Рис. 7.1. Схемы одноэлементного (а) и многоэлементного (б) автогенераторных преобразователей линейной скорости: 1- задающий элемент (кодовая маска); 2-читывающий элемент (преобразователь); 3- металлические площадки**

последовательного счета. Многоэлементные – могут быть измерительными преобразователями считывания параллельного или последовательного действия. На рис. 7.1 приведены одноэлементные (*a*) и многоэлементные (*b*) автогенераторные формирователи дискретного сигнала. Одноэлементные преобразователи в зависимости от числа металлических тел на одном задающем элементе подразделяются на преобразователи с однократным задающим элементом и преобразователи с многократными задающими элементами.

К первой группе относятся сигнализаторы фиксированной

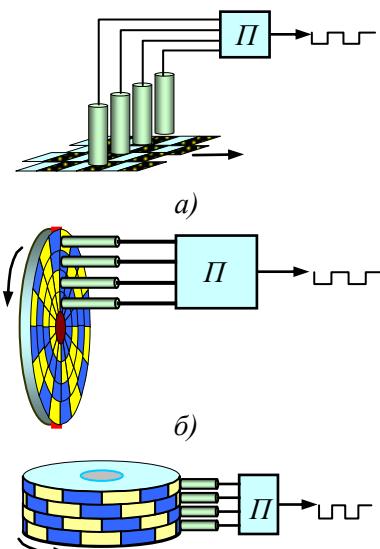


**Рис. 7.2. Схемы одноэлементных преобразователей с многократными задающими элементами:**  
*а)* преобразователя линейной скорости; *б)* и *в)* преобразователи угловой скорости

величины, измерительные преобразователи импульсного типа. Ко второй подгруппе относятся измерительные преобразователи последовательного счета. Многоэлементные автогенераторные преобразователи, как правило, имеют задающий элемент в виде кодовой маски из металлических и неметаллических тел и используются в качестве измерительного преобразователя считывания. На рис. 7.2. приведены схемы одноэлементных автогенераторных дискретных преобразователей с многократными задающими элементами. На рис. 7.2, *a* приведена схема преобразователя скорости или длины пути перемещения задающего эле-

мента. При движении задающего элемента против торца неподвижного чувствительного элемента срыв генерации и восстановление генерации чередуются в соответствии с чередованием металлических и неметаллических участков задающего элемента. На выходе преобразователя получается последовательность прямоугольных импульсов. При измерении длины пути задающего элемента носителем информации является число последовательных импульсов, которые впоследствии методом последовательного счета преобразуются в кодовый сигнал. При измерении скорости движения задающего элемента носителем информации является длительность импульса или паузы между импульсами.

Эти сигналы в дальнейшем могут быть преобразованы в кодовый сигнал методом последовательного счета. Для определения направления движения в этих преобразователях исполь-

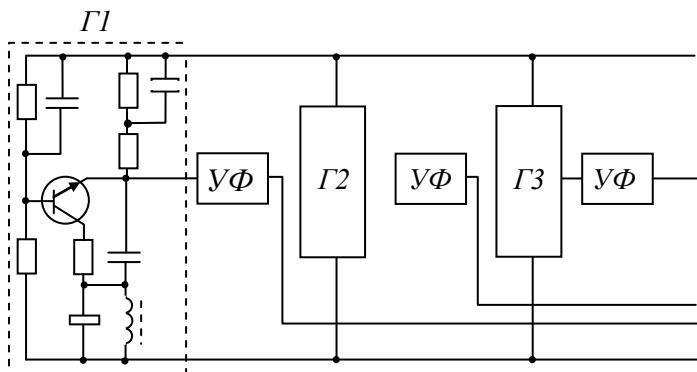


**Рис. 7.3. Схемы многоэлементных автогенераторных дискретных преобразователей в код:**  
**а) линейной скорости и**  
**б) в) угловой скорости**

зуют дополнительные элементы, работающие также по принципу срыва генерации. На рис. 7.2, б, в, приведены схемы преобразователей числа оборотов или угловой скорости вала задающего элемента. Принцип действия этих преобразователей не отличается от принципа действия преобразователя линейных перемещений. На рис. 7.3 приведены схемы, отражающие принцип построения многоэлементных автогенераторных преобразователей линейных и угловых перемещений (скоростей) в код. Все разновидности преобразователей отличаются только конструкцией кодирующего (задающего) элемента, который может быть в виде прямоугольной пластины (а), диска (б), барабана (в), и т. д. При нелинейной зависимости между угловым или ли-

нейным перемещением и первичным технологическим параметром, с целью получения одного кодового сигнала, являющегося линейной функцией первичного параметра, на кодирующий элемент наносится нелинейная маска, являющаяся обратной функцией зависимости между перемещением и первичным параметром, т.е. производится неравномерное (функциональное) квантование по уровню.

Схема преобразователя параллельного действия приведена на рис. 7.4. Схема  $n$  – разрядного преобразователя состоит из  $n$  автогенераторов  $\Gamma 1 \dots \Gamma N$ , катушки индуктивности которых являются разрядными чувствительными элементами преобразова-



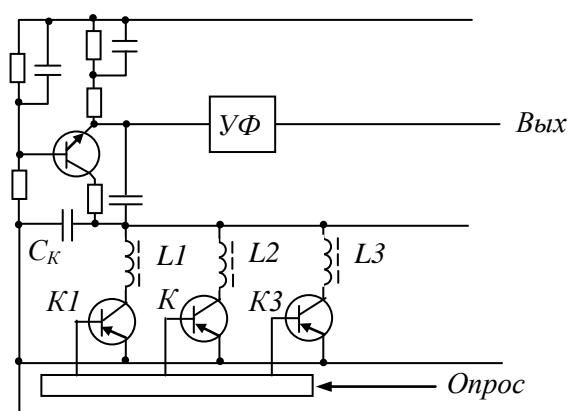
**Рис. 7.4. Схема автогенераторного преобразователя параллельного действия**

теля. При поступлении на вход коммутатора импульсов опроса разрядные автогенераторы по очереди подключаются к источнику питания. В зависимости от наличия или отсутствия перед катушкой индуктивности данного генератора металлического или неметаллического участка кодовой маски на его выходе отсутствует или появляется импульс. Поэтому на параллельных выходах  $1, 2 \dots N$  получаются единицы или нули кодовой комбинации, соответствующей данному положению кодовой маски.

Преобразователи параллельного действия имеют следующие недостатки: на каждый разряд требуется свой автогенератор и усилитель-формирователь  $U\Phi$  импульсов, а чувствитель-

ные элементы имеют одинаковую частоту и влияют друг на друга.

С этих точек зрения наиболее компактными являются преобразователи последовательного действия, которые нашли широкое применение. Принципиальная схема преобразователя последовательного действия приведена на рис. 7.5. Она состоит из одного автогенератора на все разряды и одного усилителя-формирователя прямоугольных импульсов. Колебательный контур автогенератора состоит из емкости  $C_k$  и индуктивностей чувствительных элементов  $L_1, L_2 \dots L_N$ , подключаемых по очереди к контуру с помощью ключей  $K_1, K_2 \dots K_N$ . Преимущества схемы последовательного действия перед схемой параллельного действия заключаются в следующем: схема наиболее компактна; в силу того, что в определенный момент времени к контуру подключается один из чувствительных элементов, а остальные отключены от контура с помощью ключей, генераторы не действуют друг на друга и, следовательно, могут быть конструктивно расположены рядом. Это, в свою очередь, упрощает конструкцию съемника из чувствительных элементов. При поступлении опросных импульсов на вход коммутатора на его выходах



**Рис. 7.5. Схема автогенераторного преобразователя последовательного считывания**

$1, 2, \dots N$  по очереди появляются импульсы, которые за соответствующее время поступают на входы ключей  $K_1, K_2 \dots K_N$  и соответственно по очереди подключают к контуру автогенератора чувствительные элементы  $L_1, L_2 \dots L_N$ . При подключениях к колебательному конту-

ру того или иного чувствительного элемента в зависимости от наличия перед торцом чувствительного элемента металлического или неметаллического участка кодовой маски генерация срывается или возникает. На выходе усилителя-формирователя прямоугольных импульсов УФ при этом в соответствии с состоянием генератора отсутствует или появляется прямоугольный импульс. Последовательность отсутствия и наличия прямоугольных импульсов составляет кодовую комбинацию, соответствующую картине участка маски кодирующего элемента, находящегося перед съемником кодов в момент опроса.

Основным недостатком описанного преобразователя считывания является то, что подключение чувствительных элементов параллельно через бесконтактные ключи в контур ограничивает число чувствительных элементов преобразователя.

## 7.2. Оптические дискретные преобразователи. Дифракционные решетки

Совместно с фотоэлементами в импульсных схемах применяются диски, линейки, выполненные из прозрачного материала, с нанесенными на них штрихами или дифракционные решетки. В настоящее время известны линейки, имеющие 1000 штрихов на 1 мм. На рис.7.6 показаны схемы преобразователей линейного (а) и вращательного (б) перемещений, состоящих из

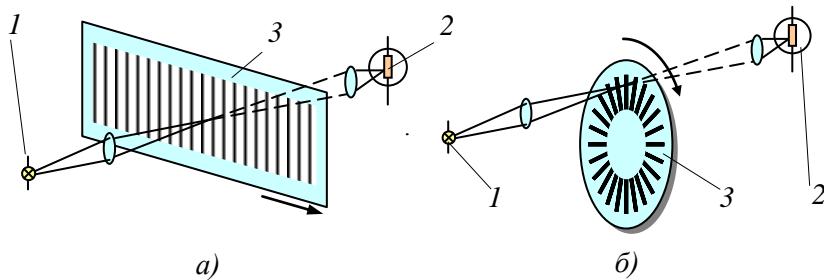
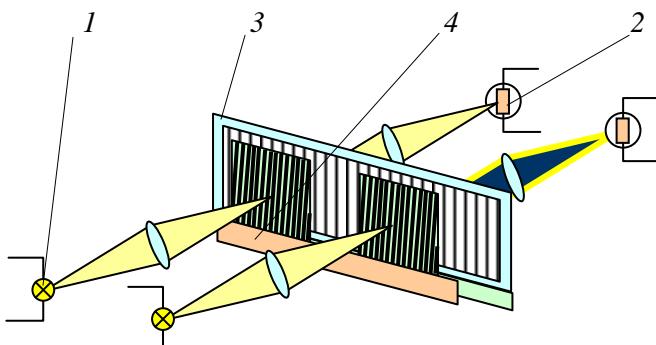


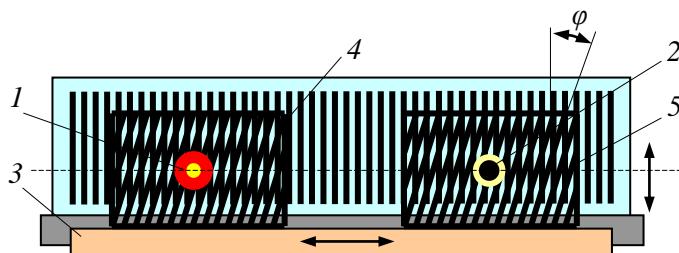
Рис. 7.6. Схемы оптических преобразователей с применением дифракционных решеток линейного (а) и углового перемещений (б): 1- источник света; 2- фотоприемник; 3- задающий элемент со штрихами

излучателя света 1, приемника 2, линейки или диска со штрихами 3. При большом количестве штрихов количество света, проходящее через один штрих, становится недостаточным для срабатывания фотоэлемента. Этот недостаток можно устранить, если для освещения фотоэлемента использовать одновременно несколько промежутков (рис. 7.7). Реализация этого способа осуществляется при помощи дифракционных решеток. Преобразователи для линейных перемещений имеют длинную дифракционную решетку, закрепленную на неподвижной части рабочего органа управления, и короткую, закрепленную на



**Рис. 7.7. Схема преобразователя перемещений (скоростей) с применением дифракционных решеток: 1- источник света; 2- фотоприемник; 3- дифракционная решетка; 4- подвижная линейка с двумя заштрихованными прозрачными под углом пластинами**

подвижной части (рис. 7.8). Короткую решетку устанавливают с некоторым перекосом, так чтобы штрихи обеих решеток пересекались под небольшим углом  $\varphi$ . Со стороны подвижной решетки располагают источник света 1 с оптическим устройством для фокусировки луча, а с другой стороны – фотоэлементы 2. При движении рабочего органа 3 штрихи решетки закрывают или открывают промежутки между штрихами подвижной линейки 4. В этом случае в местах пересечения штрихов, не пропускающих свет, получаются «муаровые» темные горизонтальные полоски 5, перемещающиеся перпендикулярно движению рабочего орга-

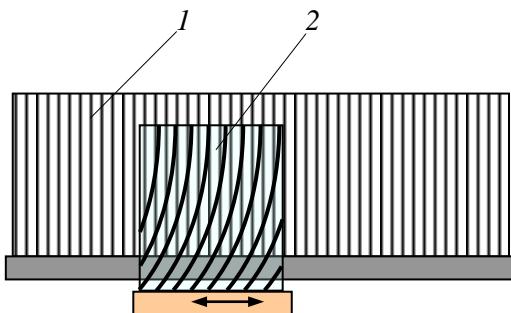


**Рис. 7.8. Схема получения муаровых полос: 1- прохождение луча света; 2- закрывание луча света; 3- задающий элемент; 4- решетка с наклонными штрихами; 5- муаровая полоса**

на, т.е сверху вниз или снизу вверх. Направление движения по перечных муаровых полос зависит от направления относительного движения дифракционных решеток. Перемещение решеток на один шаг соответствует полному чередованию света и тени в какой-либо определенной точке линейки. Зная число муаровых полос, прошедших через контрольную точку, можно точно измерить относительное перемещение решеток, а скорость перемещения рабочего органа определить по количеству муаровых полос в единицу времени. Сигналы с фотоэлемента поступают в электронную измерительную систему, которая выдает два импульса при прохождении одной муаровой полосы. Второй фотоэлемент, который используют для определения направления движения подвижной части объекта управления, устанавливают от первого на расстоянии  $1/4$  величины промежутка между штрихами. Чувствительность таких преобразователей очень высокая и определяется формулой:

$$S = \frac{dy}{dx} = C \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $x$  – передвижение подвижной решетки;  $y$  – поперечное перемещение муаровой полосы;  $\varphi$  – угол наклона штрихов подвижной решетки относительно линии штрихов неподвижной решетки.



**Рис. 7.9. Схема применения функциональной подвижной решетки: 1- неподвижная дифракционная решетка; 2- функциональная подвижная решетка**

Например, при угле наклона  $1'$  чувствительность будет  $S = C \operatorname{tg} 1' = 2,0 \cdot 10^5$ , при  $1''$   $S C \operatorname{tg} 1'' = 3,4 \cdot 10^3$ . При ширине штриха  $1/500$  мм и длине линии 20 мм чувствительность  $S = \frac{20}{1/500} = 1 \cdot 10^4$ .

В случаях, когда движение задающего элемента нелинейное, выходной сигнал можно линеаризовать функциональными решетками (обратно функциональными кривыми штрихами) подвижной или неподвижной решетки, как показано на рис. 7.9.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы автогенераторного дискретного одноэлементного преобразователя?
2. В каких случаях применяются многоэлементные дискретные преобразователи?
3. Перечислите преимущества и недостатки оптических дискретных преобразователей.
4. Какие полосы называются муаровыми?
5. Приведите примеры применения оптических дифракционных решеток.

### 7.3. Волоконно-оптические преобразователи

Одним из универсальных элементов, осуществляющих преобразование физических величин, являются оптоэлектронные преобразователи, где под воздействием физической величи-

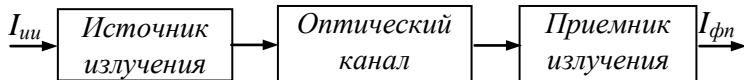


Рис. 7.10 Блочная схема волоконно-оптического преобразователя некогерентного излучения

ны изменяется интенсивность потока некогерентного излучения. В этих преобразователях измеряемая величина воздействует на оптический канал, изменяя световой поток при его распространении от источника к приемнику (рис. 7.10).

Оптический канал может быть составлен из двух световодов в виде стеклянного волокна диаметром в несколько микрон и промежутка между ними (рис. 7.11). Световой поток излучателя 4 вводится в световод 1. На выходе второго световода 2 измененный в промежуточной среде 3 поток падает на фотоприемник 5, преобразуемый впоследствии в пропорциональный электрический сигнал.

Физическую основу таких преобразователей составляет

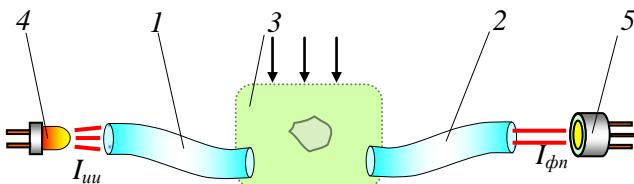


Рис. 7.11. Схема оптико-волоконного преобразователя: 1- световод излучателя; 2- световод фотоприемника; 3- промежуточная среда; 4- излучатель; 5- фотоприемник

изменение интенсивности излучения, проходящего с выхода передающего световода 1 на вход приемного световода 2. Моду-

ляция светового потока излучения осуществляется в промежутке  $z$  между двумя световодами. Такие устройства называются волоконно-оптическими преобразователями с внешней модуляцией.

Для волоконно-оптических преобразователей (ВОП) характерны два основных способа получения информации. Первый отображает работу ВОП рефлектометрического типа. Здесь поток излучения с выхода передающего световода направляется на отражающую поверхность объекта и часть отраженного потока, зависящая от положения поверхности объекта, ее формы и отражающих свойств, воспринимается входным торцом приемного световода. Излучающий и принимающие торцы неподвижны друг относительно друга, изменяется положение поверхности контролируемого объекта. Изменение светового потока при

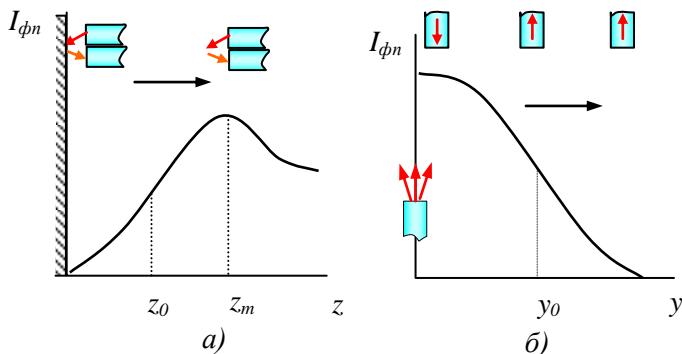
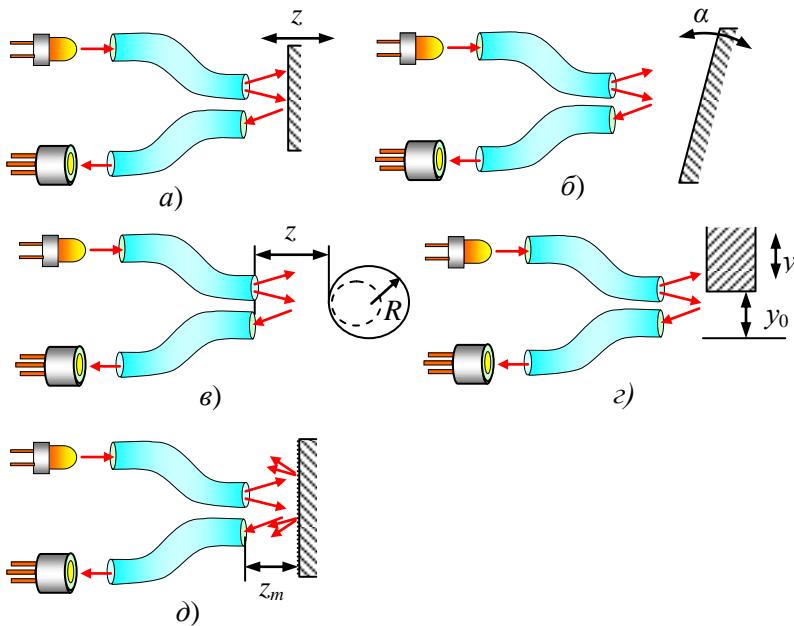


Рис. 7.12. Способы преобразования информации: *а)* при отражающем способе (рефлектометрический); *б)* при проходящем способе

таком способе показано на диаграмме (рис. 7.12). На диаграмме (*а*) видно, что при контакте с поверхностью торцов световодов световой поток к фотоприемнику практически не проходит. При увеличении расстояния  $z$  поток излучения возрастает. При дальнейшем увеличении расстояния потери преобладают, рост потока замедляется и вблизи некоторого расстояния поток остается постоянным. А последующее увеличение приводит к уменьше-

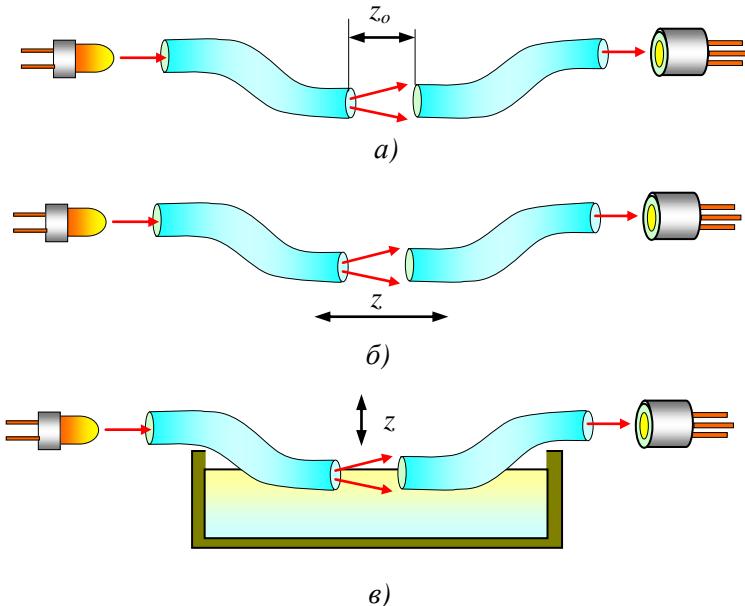
нию потока. Функция преобразования такого ВОП имеет линейный участок наибольшей крутизны с центром  $z_0$ .

Во втором способе (рис. 7.12, б) поток излучения, выходящий с торца передающего световода, направляется на торец приемного световода и модуляция осуществляется либо изменением взаимного расположения торцов под действием физической величины, либо изменением условий распространения потока между неподвижными каналами. В некоторых случаях конструкция содержит дополнительное механическое звено, обеспечивающее преобразование физической величины в перемещение



**Рис. 7.13. Схемы построения модуляций в ВОП преобразователях:** а) при аксиальном перемещении; б) при угловых перемещениях; в) при изменении формы отражающей поверхности; г) при ортогональном перемещении поверхности; д) при изменении поглощающих свойств поверхностей

ние одного из торцов световодов. Рассмотрим ортогональное

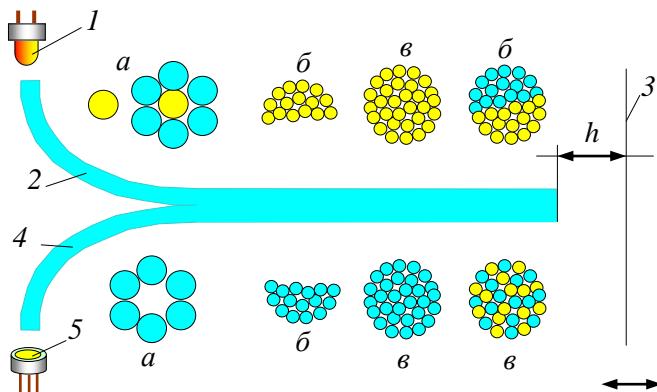


**Рис. 7.14. Способы модуляции при проходящем способе:** а) при постоянном расстоянии торцов волокон; б) при изменении расстояния между торцами волокон; в) при изменении положений торцов волокон

(поперечное) перемещение одного из торцов световода. Если торцы параллельны и оси совпадают, то поток, передаваемый к фотоприемнику, имеет максимальное значение. При перемещении начинается выход лучей, переносящих большую часть общего потока излучения за пределы торца приемного световода. Это приводит к уменьшению светового потока. На рис. 7.12, б видно, что преобразование перемещений целесообразно вблизи точек перегиба  $y_0$  на участке наибольшей крутизны и линейности.

Для рефлектометрических волоконно-оптических преобразователей используется модуляция потока при аксиальном движении отражающей поверхности (рис. 7.13, а): модуляция потока при угловых перемещениях плоской отражающей по-

верхности ( $\delta$ ), модуляция потока за счет изменения формы отражающей поверхности ( $\vartheta$ ), модуляция потока за счет ортогонального перемещения границ поверхностей с различными отражающими свойствами ( $\varepsilon$ ), модуляция потока при изменении



**Рис. 7.15. Схемы расположений волокон в жгутах ВОП:** 1- излучатель, 2- световодный жгут, 3- непрозрачное тело, 4- световодный жгут, 5- приемник

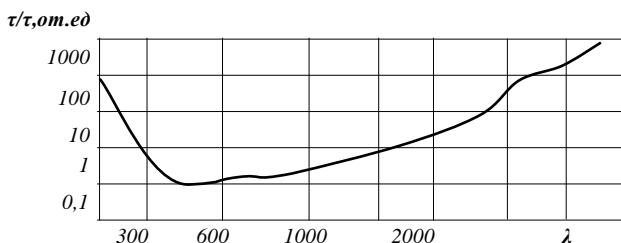
поглощающих свойств неподвижных поверхностей ( $\delta$ ). А на рис. 7.14,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  показаны способы модуляции потока при проходящем способе.

Приемный и передающий каналы могут быть выполнены как из отдельных волокон, так и из жгутов из них (рис. 7.15). Наибольшее распространение получили волоконно-оптические преобразователи с каналами, состоящими из жгутов со случайным распределением торцов передающих и приемных волокон на общем торце жгута (рис. 7.15,  $c$ ), жгутов, в которых на общем торце группа передающих или приемных волокон окружена группой приемных ( $a$ ) жгутов, в которых на общем торце группа передающих волокон расположена рядом с группой приемных волокон ( $b$ ).

Максимальную чувствительность при бесконтактном измерении аксиальных перемещений имеют ВОП со случайным распределением приемных и передающих волокон на общем

торце. Эти конструктивные решения не позволяют установить  $z_0$  более чем 3 – 5 мм. Для увеличения  $z_0$  используют специальные оптические насадки. При таком способе  $z_0$  достигает до 10 – 20 метров. Для передачи информации на расстояния более 20 метров целесообразно использовать волоконно-оптические преобразователи, составленные из волокон, используемых в оптических линиях связи, где одно излучающее волокно окружено приемными.

Волоконно-оптические преобразователи с одним излучающим волокном дают наивысшую локальность. Минимальные размеры чувствительного элемента, вводимого в зону измерений, при большой протяженности линейного участка могут быть получены с помощью приемно-передающего канала, выполненного в виде одного световода. Здесь поток от источника



**Рис. 7.16. Поглощение световых волн в световодах, изготовленных из оптических стекол, в зависимости от длины волн света**

излучений вводится в световод через полупрозрачное зеркало. Отраженный по этому же световоду поток возвращается к фотоприемнику. Такая схема предполагает значительные потери энергии из-за введения полупрозрачного зеркала. Любой ВОП состоит из передающего, приемного волокон (световод), излучателя света и приемника излучения.

Световод – это материальный канал, по которому может передвигаться излучение. Распространение потока излучения по оптическому волокну определяется потерями на отражение от торцов  $\tau_1$ , потерями на поглощение в материале световода  $\tau_2$  и потерями при полном внутреннем отражении в волокне  $\tau_3$ .

Коэффициент светопропускания определяется формулой:

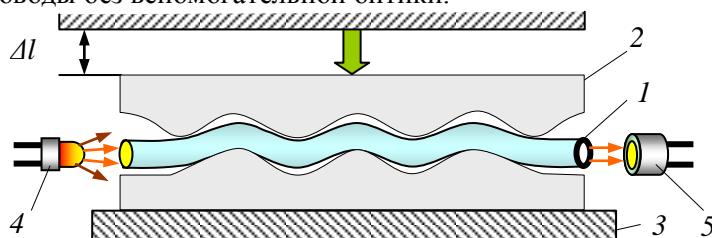
$$\tau(\varphi) = (1 - \rho_\phi)^2 \tau_1 \tau_2 \tau_3,$$

где  $\rho_\phi$  – коэффициент френелевского отражения от торцов. Светопропускание зависит еще от длины волны излучения  $\lambda$ . Из рис. 7.16 видно, что поглощение в световодах, изготовленных из оптических стекол, минимально для волн  $0,3 - 1,5$  мкм.

В качестве источников газоразрядные лампы практически не применяются из-за сложности подавления пульсаций лампы. Лазерные источники излучения, несмотря на высокую стоимость, на несколько порядков превышают потоки других источников излучения. Несмотря на то, что лазерные диоды позволяют получить большую мощность излучения, узкая диаграмма направленности ограничивает их применение.

Лампы накаливания в значительной степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к источникам излучения для волоконно-оптических преобразователей; имеют непрерывный спектр излучения, диапазон охватывает как видимую, так и инфракрасную область ( $\lambda = 0,4 \div 4$  мкм). Они являются высоконерционными источниками и поэтому имеют малый коэффициент пульсации.

Светодиоды как мощные инфракрасные  $\lambda = 1$  мкм источники излучения, наряду с лампами накаливания, удовлетворяют большинству требований. Их особенностью является узкая диаграмма направленности излучения, позволяющая вводить поток в световоды без вспомогательной оптики.



**Рис. 7.17. Модуляция света деформацией оптического волокна:** 1-оптическое волокно; 2-рефленая пластина – задающий элемент; 3-основание; 4-излучатель; 5- фотоприемник

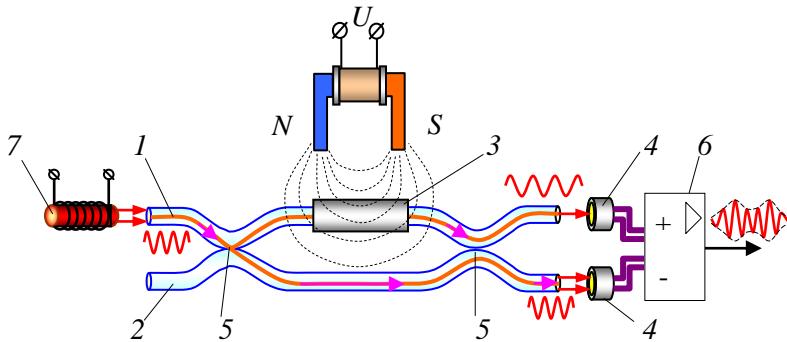
К основным типам фотоприемников относятся fotoумножители, fotosопротивления, фотодиоды и фототранзисторы.

Среди перечисленных приемников наиболее приемлемыми типами являются фотодиоды и фототранзисторы. Спектральная чувствительность кремниевых фотодиодов и фототранзисторов хорошо согласуется со спектральными характеристиками ламп накаливания. Fotoумножители не применяются из-за их габаритов, сложности источников питания и высокой стоимости. Фоторезисторы не пригодны из-за их большой постоянной времени.

Разработаны приборы, использующие свойство преломления света (рис. 7.17). Сильная зависимость условий распространения света по волокну от показателя преломления оболочки превращает оголенную сердцевину световода в чувствительный рефрактометр. На этой основе контролируются уровень воды, особенно уровень горючих веществ, где нельзя использовать электрические преобразователи, заряд аккумуляторов, где используется зависимость показателя преломления электролита в аккумуляторе от величины заряда.

Преобразователи, основанные на деформациях волокон, применяют для регистрации акустических волн, магнитных и электрических полей, температуры, ускорения, смещения и т.д. На этой основе работают преобразователи, регистрирующие перемещения до  $10^{-6}$  мкм (порядка 0,01 размера атома). Деформация волокна приводит к потере интенсивности света в волокнах. Например, всего 100 микроизгибов микронной длины ослабляют свет почти в 100 раз. Эти преобразователи преобразуют регистрируемое физическое явление в небольшие смещения рефлектирующих пластин, деформирующих волокно. Фотоприемник на выходном торце световода регистрирует все изменения светового потока, вызванные наведенными микроизгибами.

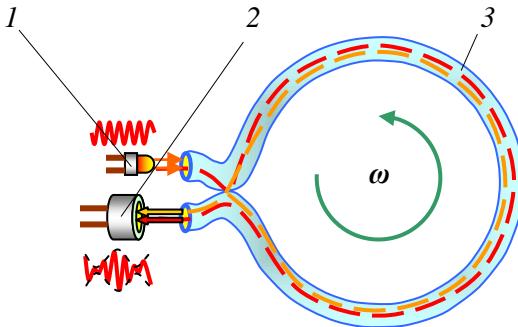
В двухволоконном варианте, для определения величины сдвига за счет внешнего воздействия фаза световой волны в измерительном волокне сравнивается с фазой в опорном волокне (рис. 7.18). При этом применяются только одномодовые волокна. В них может распространяться только один тип световой волны (мода). Такое свойство реализуется за счет выбора достаточно малого диаметра сердцевины (1 – 16 мкм) или с помощью



**Рис. 7.18. Схема ВОП, работа которого основана на изменении фазы светового потока в измерительном волокне:** 1- измерительное волокно; 2- опорное волокно; 3- специальное покрытие; 4- фотодетектор; 5- ответвитель; 6- усилитель; 7- лазерный излучатель

уменьшения разницы показателей преломления жилы и оболочки. Источником излучения является лазер. Измерительное и опорное волокна имеют одинаковую длину оптического пути, разница должна быть существенно меньше длины волны когерентного лазерного излучения. Под внешним воздействием изменение длины или показателя преломления материала измерительного волокна приводит к фазовому сдвигу волны. Для превращения фазовой модуляции в амплитудную излучение измерительного и опорного волокон суммируются при помощи симметрично направленного ответвителя. На выходах ответвителя располагаются два фотодетектора. На этой основе работают и термопреобразователи, регистрирующие колебания температуры до одной миллионной доли градуса при частотах, недоступных для любых других известных методов измерений. Малые размеры и полная нечувствительность к электромагнитным полям позволяют применять их для оперативного контроля температуры в недоступных ранее местах.

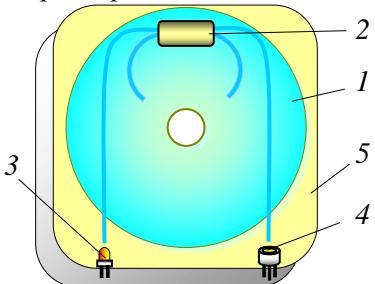
В одноволоконных интерферометрических преобразователях один и тот же направленный ответвитель служит и для разделения входного светового потока, и для суммирования интерферирующих волн (рис. 7.19). Поскольку интерферирующие



**Рис. 7.19. Одноволоконный интерферометрический преобразователь вращения: 1- лазерный излучатель; 2- светоприемник; 3- световолокно**

вращении нарушается симметрия условий распространения интерферирующих волн.

На этом принципе создан высокочувствительный гироскоп размером всего  $5 \times 5 \times 1$  см. Основа прибора – катушка одномодового волокна длиной около 450 метров (рис. 7.20).

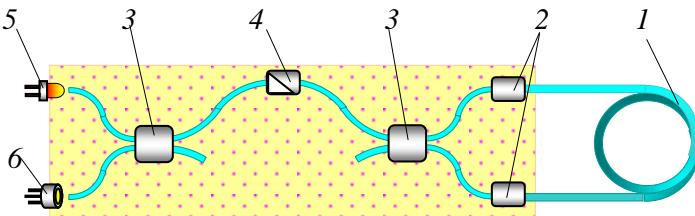


**Рис. 7.20. Схема волоконно – оптического гироскопа: 1- катушка оптического волокна; 2- оптическая интегральная схема; 3- излучатель; 4- фотоприемник; 5- корпус**

волны распространяются в противоположных направлениях по одному и тому же световоду, не требуется высокая когерентность источника излучения, а также стабильность длины оптического пути световодов. Такой

преобразователь чувствителен только к углу поворота в пространстве, так как только при

вращении нарушаются симметрия условий распространения интерферирующих волн. На этом принципе создан высокочувствительный гироскоп размером всего  $5 \times 5 \times 1$  см. Основа прибора – катушка одномодового волокна длиной около 450 метров (рис. 7.20). В нем все элементы, формирующие и анализирующие оптический сигнал, – ответвители, модуляторы и т.д. – изготовлены в виде одной оптической интегральной схемы на основе ниобата лития. В отличие от механических гироскопов, в оптическом нет движущихся частей, он в десятки раз легче и готов к работе сразу же после включения.



**Рис. 7.21. Схема одной координаты оптического гироскопа:**  
**1- катушка оптического волокна; 2- модулятор; 3- ответвитель;**  
**4- поляризатор; 5- излучатель; 6- фотоприемник**

Этот волоконно-оптический гироскоп может регистрировать как очень малые угловые скорости – до 0,1 град/ч, так и с высокой точностью большие – более 1000 град/с.

Для полного трехкоординатного гироскопа потребуются три идентичные катушки, причем все элементы формирования и обработки оптических сигналов можно будет разместить на одном кристалле интегральной схемы.

Взаимные расположения элементов для одной координаты гироскопа показаны на рис. 7.21.

С увеличением числа преобразователей и исполнительных устройств увеличивается число проводов жгута, что увеличивает массу автомобиля. Эффективным средством сокращения числа жгутов и снижения массы является мультиплексная (устройство, объединяющее несколько сигналов) сеть на оптических волокнах.

Сигналы преобразователей автомобиля поступают в мультиплексор и передаются **по одному световоду** в систему управления. Обработанный в электронном блоке управления сигнал передается к демультиплексору и далее к исполнительным устройствам автомобиля.

### Контрольные вопросы

- На каком явлении основано распространение света внутри оптического волокна?
- Перечислите виды модуляции в ВОП.
- Какие физические величины и явления контролируются ВОП?
- Покажите способы комбинации осветительных и приемных жгутов ВОП.

## 7.4. Струнные преобразователи

Подавляющее большинство информационных устройств имеют выходной сигнал в форме тока и напряжения, промодулированных по амплитуде. Низкая помехоустойчивость таких сигналов существенно снижает метрологические характеристики, а необходимость применения аналого-цифрового преобразователя для ввода сигнала в ЭВМ приводит к возрастанию затрат при эксплуатации. Кроме того, низкая помехоустойчивость ограничивает их применение на дистанционных системах измерения.

Одним из перспективных направлений является создание системы измерительных преобразователей различных физических величин в частоту. Это обусловлено тем, что на современном уровне развития техники частота является одной из наиболее точно измеряемых физических величин с погрешностью не более  $10^{-9}$ . Частотный выходной сигнал может быть преобразован в код практически без потери точности.

Из частотных преобразователей одним из перспективных является струнный преобразователь. Струнный преобразователь представляет собой высокодобротную механическую колебательную систему. Частота собственных поперечных колебаний

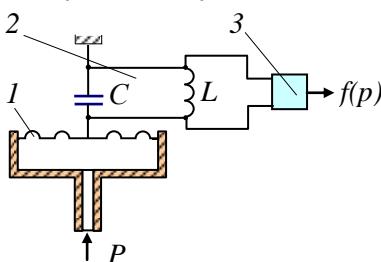


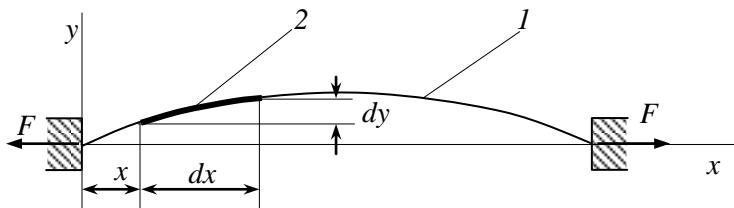
Рис. 7.22. Схема резонаторного струнного преобразователя давления: 1- мембрана; 2-  $LC$  колебательный контур; 3- преобразователь частоты электрических колебаний

струны обусловлена силой продольного натяжения. В преобразователях такого типа струна является частотозадающим элементом.

Применение струнных элементов позволяет повысить точность до  $10^{-9}$ , дает возможность исключить из системы аналого-цифрового преобразователя (ЦАП), изменение сопротивления линии связи, а воздействие паразитных термо – ЭДС не вызывают дополнительных погрешностей измерения.

Преобразователи можно разделить на классы по виду физического явления, положенного в основу их работы, например: резонаторные, с нерезонирующими частотно-зависимыми системами, интегрирующие, статические. Наибольшее применение находят резонаторные. На рис. 7.22 представлена схема резонаторного преобразователя давления с  $LC$  – частотозадающим контуром. Емкость  $C$  изменяется при прогибе мембранны 1 под давлением  $P$ . Изменение емкости приводит к изменению частоты контура автогенератора. Выходная частота является функцией давления.

Устройства с частотным преобразователем тоже относятся к классу аналоговых, но в отличие от аналоговых устройств с амплитудной модуляцией выходного сигнала их выходной сигнал может быть преобразован в форму кода анало-



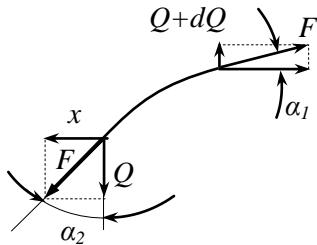
**Рис. 7.23. Схема струны конечной длины: 1- струна; 2- элемент струны**

го – цифровым преобразователем частота – код с любой наперед заданной точностью.

Одним из рациональных методов измерения является струнный метод.

Рассмотрим струну конечной длины  $l$ , жестко закрепленную с обоих концов и имеющую бесконечно малую амплитуду колебаний (рис. 7.23). Выделим элемент струны длиной  $dx$  и массой  $dm$ , (рис. 7.24). Сумма сил  $Q$  и  $Q+dQ$  должна уравновешиваться инерционной силой  $dm \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ , где  $dm = \frac{m}{l} dx = \rho dx$ ;

$\frac{\partial y}{\partial x} = \operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$ . Далее преобразуем эти выражения:



**Рис. 7.24. Схема приложения сил на элемент струны**

$$dm \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \sin \alpha_1 - F \sin \alpha_2 =$$

$$F(\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2) = F \left( \frac{\partial y_1}{\partial x} - \frac{\partial y_2}{\partial x} \right);$$

Сокращая на массу  $m$ , будем иметь

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{lF}{mdx} \left( \frac{\partial y_1}{\partial x} - \frac{\partial y_2}{\partial x} \right) = \frac{lF}{m} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2},$$

учитывая  $\frac{\partial y_1}{\partial x} = f(x, t)$ ; и

$\frac{\partial y_2}{\partial x} = f(x + \Delta x, t)$ , а также  $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial f}{\partial x}$ ,

имеем

$$\frac{\frac{\partial y_1}{\partial x} - \frac{\partial y_2}{\partial x}}{dx} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}.$$

Теперь эта сила будет иметь вид:

$$dm \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx,$$

при однородной струне

$$dm = \frac{m_c}{l} dx.$$

Дифференциальное уравнение движения элемента струны можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{Fl}{m_c} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2};$$

если принять  $\frac{Fl}{m_c} = a^2$ , то

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}. \quad (7.1)$$

При граничных условиях на концах струны  $x=0$ ,  $x=l$ ,  $y=0$  и при начальном условии  $t=0$  общее решение уравнения (7.1) будет иметь вид:

$$y = C_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \frac{an\pi}{l} (t - \tau_n),$$

где  $C_n$ ,  $\tau_n$  – постоянные,  $n$  – номер гармоник.

Период колебаний струны

$$T_n = \frac{2\pi}{an \frac{\pi}{l}} = \frac{2l}{an},$$

частота колебаний

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{an}{2l},$$

с учетом  $a^2 = \frac{Fl}{m_c}$  имеем:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Fl}{m_c}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F}{m_c l}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}},$$

где  $\sigma$  – напряжение растяжения в струне,  $\rho$  – плотность материала струны.

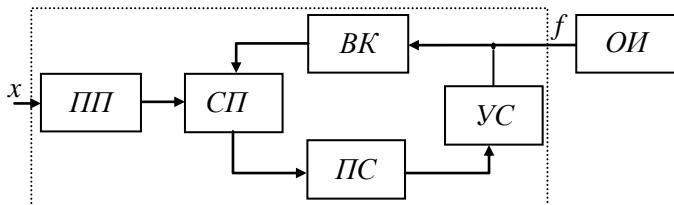
Обычно используют возбуждения колебаний струны на первой гармонике  $n=1$ . Когда один конец струны закреплен жестко, а на другом подвешен груз  $m$ , создающий силу натяжения  $F=mg$ , тогда частота поперечных колебаний будет иметь вид:

$$f_c = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0 l}{m_c}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho S}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{mg}{\rho S}},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения струны.

Естественной входной величиной струнного устройства является продольная сила, а выходной величиной будет частота.

Обобщенная структурная схема струнного преобразователя представлена на рис. 7.25. Измеряемая величина  $x$  подается на измерительный преобразователь, который трансформирует ее

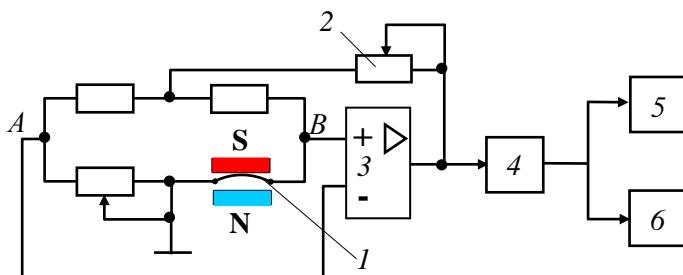


**Рис. 7.25. Обобщенная структурная схема струнного преобразователя**

в изменение силы натяжения струны преобразователя *СП*. Для получения непрерывных автоколебаний струны применяется цепь положительной обратной связи, состоящая из приемника колебаний струны *ПС*, электронного усилителя *УС* и возбудителя колебаний струны *ВК*. Одновременно с выхода усилителя сигнала подается на внешнее устройство *ОИР*.

В большинстве случаев входным устройством электронного усилителя *УС* является сбалансированный мост, одним из плеч которого является струна (рис. 7.26).

При колебаниях струны в поле постоянных магнитов в ней наводится ЭДС и с диагонали моста *AB* переменное напряжение частоты  $f$  подается на электронный усилитель 3. С вы-



**Рис. 7.26. Схема струнного преобразователя, включенного в электронный мост: 1- струна; 2- подстроичное сопротивление обратной связи; 3- операционный усилитель; 4- электронный частотометр; 5- самописец; 6- компьютер**

хода усилителя через сопротивление обратной связи 2 на вершину моста подается ток подкачки, поддерживающий незатухающие колебания струны. Изменением сопротивления 2 можно менять величину тока в цепи положительной обратной связи, изменения тем самым механическую амплитуду колебаний струны.

Одновременно с выхода усилителя 3 сигнал струнного автогенератора подается на электронный частотомер 4. С выхода частотомера 4 информация о текущем значении частоты в виде цифрового кода подается на самописец 5 и ЭВМ, обозначенный цифрой 6.

На рис. 7.27 приведены схемы применения однострунных преобразователей для измерения различных физических величин: *a*- для измерения малых масс и усилий, *b*- для измерений размеров и перемещений, *c*- для измерений давлений и перепадов давления, *d*- для измерения температуры, *e*- для измерений избыточных и абсолютных давлений, *e*- для измерения напряжения постоянного тока.

Для всех схем функция преобразования имеет вид:

$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}}$$

и может быть записана в виде:

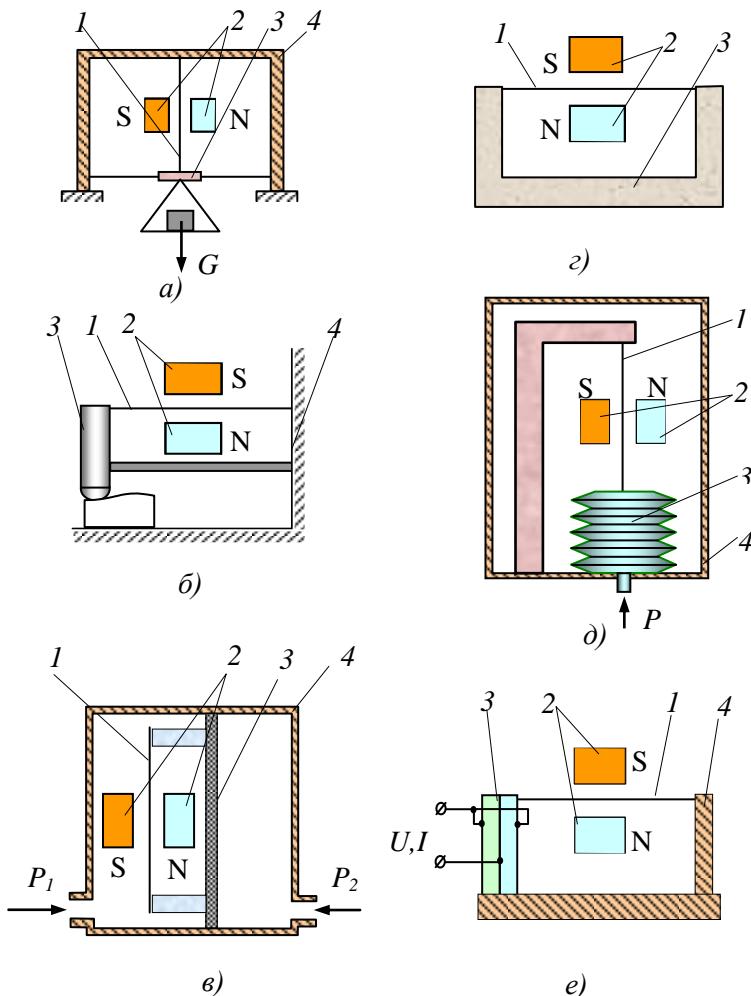
$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{kx}{F_0}},$$

где  $F_0 = mg$  – сила натяжения струны в исходном состоянии;  $\Delta F = \Delta mg$  – изменение силы натяжения при прибавлении силы; значение измеряемой величины –  $x$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $f_0$  – собственная частота колебаний струны до воздействия измеряемой физической величины.

Чувствительность преобразователя имеет вид:

$$S_x = \frac{\Delta f}{x} = \frac{1}{2} \frac{k f_0}{F_0} = \frac{1}{8} \frac{k}{l^2 \rho S_0 f_0}.$$

Большой температурной стабильностью нуля, меньшей нелинейностью функции преобразования, более высокой точностью отличаются от однострунных преобразователей диффе-



**Рис. 7.27. Схемы однострунных преобразователей для измерения:** а) малых масс; б) перемещений; в) перепадов давлений; г) температуры; д) избыточных давлений; е) напряжения или тока; 1- струна; 2- постоянные магниты; 3- преобразователь; 4- неподвижная опора или корпус

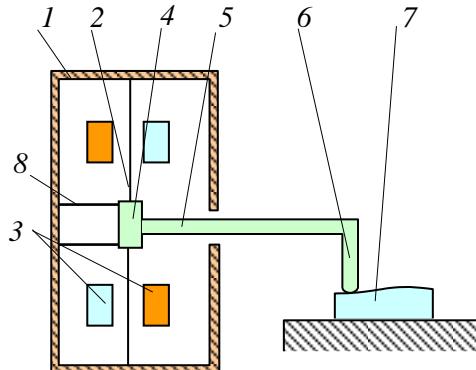
рекордные двухструнные преобразователи. Дифференциальные преобразователи состоят из двух одинаковых струн, по-

стоянных магнитов, центрального подвижного элемента на подвесе и корпуса.

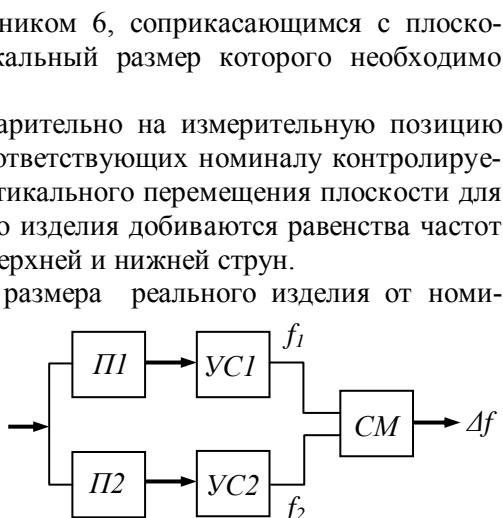
На рис. 7.28 показан вариант дифференциального преобразователя малых перемещений в частоту. Две одинаковые струны 2, помещенные в поле постоянных магнитов 3, натянуты с определенным начальным усилием. Концы струн прикреплены к корпусу 1 и центру 4, закрепленному на упругом пластиинчатом подвесе 8. Рычаг 5 оканчивается измерительным наконечником 6, соприкасающимся с плоскостью изделия 7, вертикальный размер которого необходимо определить.

Установив предварительно на измерительную позицию набор концевых мер, соответствующих номиналу контролируемого размера, путем вертикального перемещения плоскости для базирования измеряемого изделия добиваются равенства частот поперечных колебаний верхней и нижней струн.

При отклонении размера реального изделия от номинального силы продольного натяжения струн изменяются, например, верхней струны увеличится, а нижней уменьшится. Поэтому частоты колебаний струн будут различными. Подавая



**Рис. 7.28. Схема дифференциального двухструнного преобразователя малых перемещений:** 1- корпус; 2- струна; 3- постоянные магниты; 4- центр креплений струн и упругих элементов; 5- рычаг; 6- измерительный наконечник; 7- объект исследования



**Рис. 7.29. Блок-схема дифференциального струнного преобразователя**

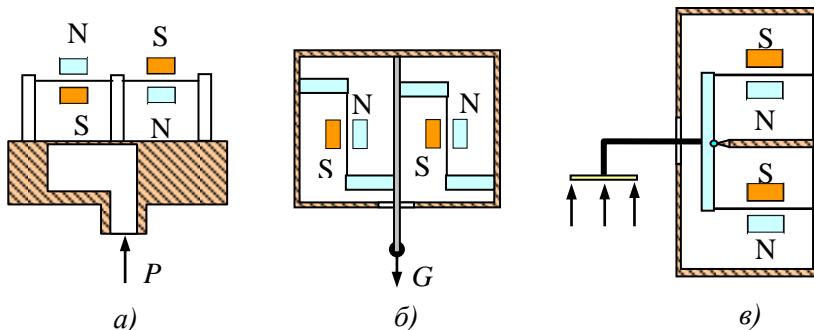
электрические сигналы частотой  $f_1$  и  $f_2$  с выхода усилителей  $YC1$  и  $YC2$  струнных преобразователей  $P1$  и  $P2$  на смеситель  $CM$ , получим разностную частоту  $\Delta f = f_1 - f_2$ . (рис. 7.29).

Приближенно выражение разностной частоты можно представить в виде:

$$\Delta f = \frac{k f_0}{F_0} \delta ,$$

где  $\delta$ —отклонение размера изделий от номинального;  $\frac{k f_0}{F_0}$  - коэффициент пропорциональности, обусловленный конструктивными параметрами струнного преобразователя.

На рис. 7.30 представлены некоторые схемы струнных дифференциальных преобразователей: *а)* для измерений давления  $P$ ; *б)* для измерений силы тяжести  $G$ , *в)* для измерений скоростей потоков сплошных сред.



**Рис. 7.30. Схемы некоторых дифференциальных струнных преобразователей: а) преобразования давления; б) преобразования силы тяжести; в) преобразования скорости воздуха или жидкости**

ков сплошных сред.

#### Контрольные вопросы

1. На каком явлении основана работа струнных преобразователей?
2. Приведите примеры применения струнных преобразователей.
3. Чем отличаются и какими преимуществами обладают дифференциальные струнные преобразователи от однострунных?

## ГЛАВА 8. Преобразователи уровня

### 8.1. Поплавковые преобразователи

Рассмотрим установившееся состояние тела в жидкости (рис. 8.1). Условие равновесия поплавка в проекции на ось  $z$  записывается формулой:

$$R - G + F_a = 0$$

$$F_a = g(V_1\rho_1 + V_2\rho_2),$$

где  $G$  – сила тяжести поплавка,  $F_a$  – подъемная (Архимедова) сила,  $R$  – реакция измерительного устройства,  $\rho_1$  – плотность жидкости,  $\rho_2$  – плотность воздуха.

Объем поплавка складывается из двух объемов:  $V = V_1 + V_2$ , то есть доля  $V_1$  в среде плотностью  $\rho_i$  и доля  $V_2$  в среде плотностью  $\rho_2$ .  $R$  – реакция является основным возмущающим фактором поплавковых преобразователей.

Изменение глубины погружения является причиной изменения частичных объемов

$$\Delta V_1 = -\Delta V_2 = -S\Delta H,$$

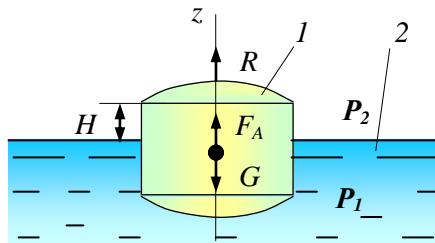
где  $S$  – площадь поперечного сечения поплавка;  $\Delta H$  – изменение глубины погружения. Если в первую среду ввести только  $V_1$ , то при  $V_2 = V - V_1$  получим:

$$g[V_1(\rho_1 - \rho_2) + V\rho_2] - G + R = 0. \quad (8.1)$$

Обычно  $\rho_2 \ll \rho_1$ , тогда выражение (8.1) упрощается:

$$gV_1\rho_1 - G + R \approx 0.$$

Выражение реакции принимает вид:



**Рис. 8.1. Схема приложенных к поплавку сил приводящие к равновесию: 1- поплавок; 2- жидкость**

$$R = G - gV_I\rho_1.$$

Поплавок не может создать управляющее воздействие, если сила тяжести поплавка и выталкивающая Архимедова силы равны по модулю.

В качестве поплавков обычно применяют полые шаровидные или цилиндрические тела, плотность которых меньше плотности жидкости, поэтому они могут плавать на поверхности жидкости.

Изменения плотности жидкости или условий трения в системе передачи показаний приводят к искажению результата измерения. Этот эффект проявляется в отношении высоты подъема тем меньше, чем более плоской формой обладает поплавок. В большинстве случаев поплавок является преобразователем уровня с электрической системой передачи данных. Ниже рассмотрим некоторые разновидности поплавковых преобразователей уровня.

## 8.2. Поплавковый преобразователь с противовесом

Объемное содержание жидких и сыпучих веществ может быть определено уровнемерами. Преобразователи уровня бывают оптические, емкостные, поплавковые, манометрические, радиоизотопные, акустические и т.д. К наиболее простым преобразователям уровня относятся плавающие и буйковые поплавковые преобразователи.

Поплавковые широко распространены вследствие простоты конструкции и высокой точности измерения (рис. 8.2). Основные элементы – поплавок 1, передаточный механизм в виде шкива 2, отсчетное устройство или преобразователь (линейка) 3, противовес 4. При изменении уровня, например, жидкости 5, поплавок 1 перемещается вместе с ней на всем диапазоне изменения.

При расчете поплавка исходят из условия, что он погружен до середины. Если поплавок уравновешивается грузом, вес груза определяют по формуле:

$$G = \left( Q - \frac{Q_{\text{ж}}}{2} \right) - Q_o ,$$

где  $Q_{\text{ж}}$  – вес объема жидкости, вытесняемой поплавком при полном погружении;  $Q_o$  – вес цепи, троса, связывающего поплавок с грузом. Расчет такого уровнемера основан на измерении линейного перемещения противовеса за счет подъема или опускания поплавка в зависимости от изменения уровня измеряемой жидкости. Чувствительность достигается уменьшением момента трения в осях роликов и подбором соответствующих размеров осей, роликов, поплавка, троса и противовеса.

Перемещение поплавка 1 и противовеса 4 возможно лишь при нарушении равенства

$$M_o = M_{mp},$$

где  $M_o = \Delta P \cdot r$  – движущий момент;  $M_{mp}$  – момент трения в

осах шкива 2;  $\Delta P$  – приращение силы  $P$ , выталкивающей поплавок 1 из жидкости 5 при изменении высоты уровня;  $r$  – радиус шкива 2. Приращению силы  $P$  соответствует изменение глубины  $h$  погружения поплавка 1:

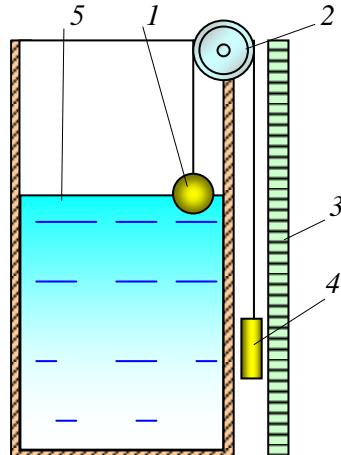
$$\Delta h = \frac{\Delta P}{S\rho},$$

где  $S$  – поперечное сечение поплавка;  $\rho$  – плотность жидкости.

При равновесном состоянии для каждой высоты уровня жидкости

$$G_e = G_n - P,$$

где  $G_e$  – вес противовеса;  $G_n$  – вес поплавка.



**Рис. 8.2. Схема уровнемера с противовесом: 1- поплавок; 2- шкив (передаточный механизм); 3- линейка (отсчетное устройство); 4- противовес; 5- жидкость**

К основным недостаткам поплавковых уровнемеров относятся: возможность коррозии и прорывание тонких стенок поплавка, приводящих к его потоплению, невысокая точность.

### 8.3. Буйковые уровнемеры

Относятся к уровням гидростатического типа. Для измерения уровня применяют тонущие поплавки-буи, частично погруженные в жидкость (рис. 8.3).

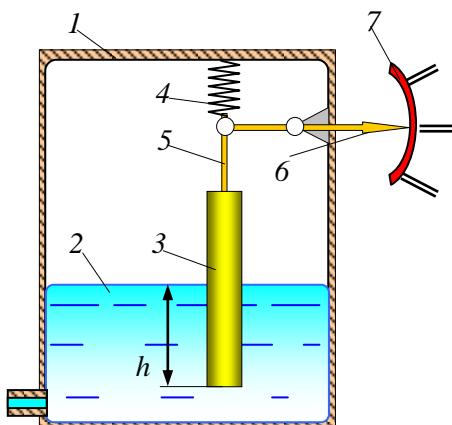
Принцип действия основан на измерении выталкивающей на буй Архимедовой силы. Погруженный в жидкость буй удерживается в заданном положении внешней, упругой силой пружины и усилием, создаваемым электрической или пневматической системами.

При изменении уровня жидкости изменяется степень погружения буя, а следовательно, и сжимающее усилие пружины под действием буя, поэтому каждому уровню соответствует определенное положение буя. Перемещение буя передается через привод стрелке или электронной схеме, показывающей уровень жидкости по шкале. Компенсирующее усилие определяется:

$$Q = P - \rho h S,$$

**Рис. 8.3. Буйковый уровнемер:** 1-емкость; 2-жидкость; 3-поплавок-буек; 4-пружина; 5-привод стрелки; 6-стрелка; 7-шкала уровня-мера

где  $P$ - вес буя;  $\rho$ - плотность контролируемой жидкости;  $S$ -сечение буя;  $h$ -текущее значение контролируемого уровня.



Удельный вес буйка рассчитывают таким образом, чтобы при полном погружении он не вспывал. Длина буйка должна быть не менее предела измерения уровня.

Буйковые преобразователи получили наибольшее распространение из-за высоких метрологических характеристик при контроле жидких сред, находящихся при высоком рабочем давлении (до 16 МПа) и в широком пределе измерения температур.

#### 8.4. Бесконтактные сигнализаторы уровня

Наряду с непрерывными преобразователями уровня широко применяются на базе поплавкового чувствительного эле-

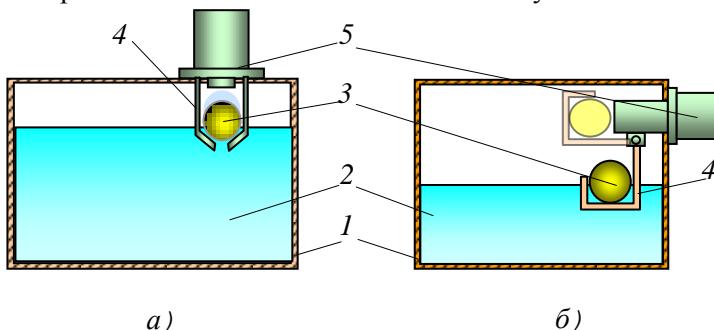


Рис. 8.4. Схемы поплавковых сигнализаторов уровня жидкости: 1-резервуар; 2-жидкость; 3-поплавок; 4-опора; 5-преобразователь

мента сигнализаторы уровня жидкости. Они относятся к дискретным элементам. На рис. 8.4, а, б показаны варианты построения бесконтактных преобразователей уровня жидкости.

Они предназначены для выдачи электрического сигнала о достижении уровня жидкости в технологических емкостях заданной величины. Сигнализаторы конструктивно выполняются в двух модификациях: для установки на емкости сверху (а) и для установки на емкости сбоку (б). Состоят из стального корпуса, чувствительного элемента-поплавка 3, преобразователя индуктивного датчика положения 5, опоры для поддержки поплавка 4. Поплавок 3 представляет собой полый металлический

шар, предназначенный для работы в жидкости при избыточных давлениях.

В варианте боковой установки узел поплавка с опорами имеет возможность опрокидываться на 90°. При отсутствии жидкости поплавок занимает вертикальное положение под действием собственной силы тяжести. При подъеме уровня жидкости вместе с ним поднимается металлический поплавок, имеющий возможность двигаться. Поворот опоры вместе с поплавком сближает поплавок к индуктивному преобразователю 5. При достижении поплавка зоны чувствительности индуктивного преобразователя 5 он срабатывает, сигнализируя об уровне жидкости 2. Погрешность срабатывания сигнализатора составляет 1,5 мм.

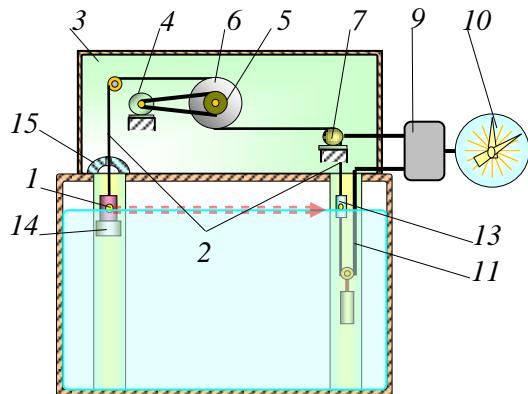
## 8.5. Радиоизотопные преобразователи уровня

Радиоизотопный следящий преобразователь уровня предназначен для непрерывного бесконтактного автоматического дистанционного контроля уровня жидкости или сыпучих материалов в закрытых резервуарах. Работа основана на том, что ионизирующее излучение источника поглощается контролируемой средой, но свободно проходит над ней, воздействуя на блок детектирования. Поступающая информация обрабатывается, и в зависимости от фазы входного сигнала источник и блок детектирования перемещается вверх или вниз в зависимости от уровня (рис. 8.5). Источник лучей  $^{137}Cs$  и приемник радиоактивного излучения расположены в герметичных вертикальных трубах, установленных внутри объекта контроля. Расположенный в корпусе датчика реверсивный двигатель через червячную передачу вращает барабан, на который наматываются две металлические ленты.

Висящие на концах этих лент источник излучения и приемник излучения расположены в одной горизонтальной плоскости. Лента, на конце которой подведен приемник, перфорирована. Если пучок гамма-излучения проходит выше или ниже измеряемого уровня, то приемник регистрирует соответственно большую или меньшую интенсивность излучения. Сигнал с

приемника через гибкий кабель поступает в электронный блок, где преобразуется, усиливается и управляет вращением реверсивного двигателя, который автоматически перемещает систему источник-приемник вслед за положением уровня.

Преобразователь устанавливают на емкостях с давлением внутри до 25 МПа. Основная погрешность измерения – не более 1 см. Скорость слежения не менее 10 см/мин. Контролируемые среды: вязкие, по агрессивности близкие к щелочам и кислотам, горючие и легко воспламеняющиеся вещества.



**Рис. 8.5. Схема радиоизотопного уровнемера:** 1- источник излучения; 2- металлические ленты; 3- датчик; 4- реверсивный двигатель; 5- червячная передача; 6- барабан; 7- сельсин-датчик; 8- зубчатый ролик; 9- электронный блок; 10- прибор; 11- кабель; 12- сельсин-приемник; 13- приемник излучения; 14- груз источника излучения; 15- экран

### Контрольные вопросы

- На каком явлении основана работа поплавковых преобразователей?
- В чем преимущества буйковых преобразователей?
- Какие преимущества и недостатки поплавковых, емкостных, оптических и радиоизотопных уровнемеров?
- Как влияет плотность жидкости на показания поплавковых, емкостных и оптических уровнемеров?

## ГЛАВА 9. Преобразователи давления

### 9.1. Жидкостный манометр

Простейший жидкостный манометр состоит из  $U$  – образной стеклянной трубки с равномерными делениями. Наименьшее деление шкалы 1мм. Оба конца трубы заполнены жидкостью до нулевой отметки (рис. 9.1, а).

При подводе давления к одному концу трубы жидкость перетекает и сквозь стекло видна разница в уровнях жидкости. Разность уровней, выраженная в миллиметрах, дает значение измеряемого давления. Если в трубку налита ртуть, давление выражается в миллиметрах ртутного столба; при заполнении трубы водой давление будет выражаться в миллиметрах водяного столба.

Если манометр заливается не водой, пересчет показаний можно сделать по следующей формуле:

$$h_0 = h_1 \rho_1 / \rho_2,$$

где  $h_0$  – измеряемое давление;  $h_1$  – фактическая разность уровней жидкости;  $\rho_1$  – плотность жидкости, залитой в манометр;  $\rho_2$  – плотность воды.

При увеличении площади поперечного сечения одного

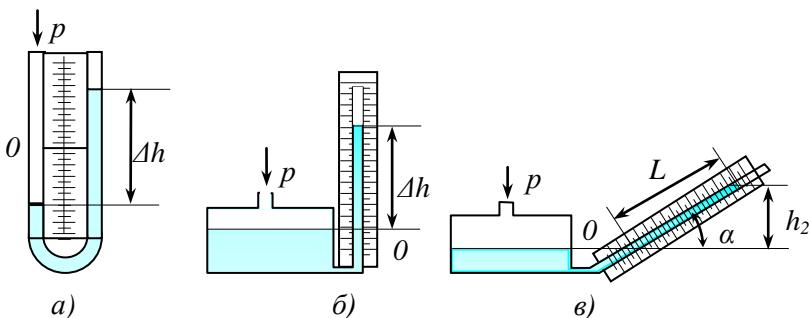


Рис. 9.1. Жидкостные манометры: а) с одинаковыми коленами  $U$ -образной трубы; б) чашечный  $U$ -образный манометр с вертикальной трубкой; в) чашечный  $U$ -образный микроманометр с наклонной трубкой

колена  $U$  – образного манометра в 10 – 20 раз по сравнению с площадью другого колена во столько же раз изменяется величина отклонения уровня в каждом колене от среднего уровня. В узкой трубке уровень поднимается на большую высоту, в то время как в широкой трубке он опустится незначительно. Величиной изменения уровня в широкой трубке при достаточно большем диаметре можно пренебречь и отсчитывать показания прибора только по изменению уровня в узкой трубке. Такой манометр называют однотрубным или чашечным (рис. 9.1, б).

На рис.9.1,в показана схема простейшего жидкостного однотрубного микроманометра с наклонной трубкой, применяемого для измерения малых давлений и разрежений или их перепадов. В этом приборе благодаря наклону трубы увеличивается масштаб показаний. Пренебрегая опусканием уровня в сосуде на величину  $h_1$ , можно написать

$$h_2 = L \rho s \sin \alpha,$$

где  $h_2$  – измеряемое давление;  $L$  – отсчет по наклонной шкале, мм;  $\rho$  – плотность залитой в прибор жидкости;  $\alpha$  – угол наклона трубы, откуда

$$L = h_2 / (\rho s \sin \alpha).$$

Из этой формулы видно, что чем меньше угол  $\alpha$ , тем больше масштаб отсчета, и наоборот. Микроманометры изготавливают с постоянным или переменным углом наклона трубы. В качестве жидкости применяют толуол или этиловый спирт.

## 9.2. Мембранные преобразователи давления

Мембраной называется гибкая, как правило, круглая пластина, деформируемая под действием давления или сосредоточенной силы.

Мембранны делятся на плоские, выпуклые (хлопающие) и гофрированные (рис. 9.2, а, б, в). Они заделываются по контуру, а центр ее перемещается на некоторое значение. Плоские мембранны (рис. 9.2, а) изготавливаются из кожи, резины, пластмассы, прорезиненной ткани и металлические. Неметаллические применяются как разделители различных сред и преобразуют давление в перемещение или усилие. При малых деформациях мембранны ее характеристика линейна (участок  $OA$ ), а при боль-

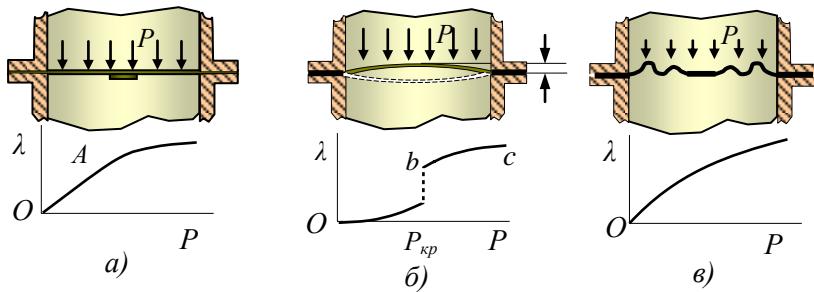


Рис. 9.2. Мембранные преобразователи: а) плоский; б) выпуклый; в) гофрированный

ших деформациях мембрана работает не на изгиб, а в основном на растяжение, и поэтому характеристика становится нелинейной. Для механической связи мембранны с последующим звеном автоматического устройства в центральной части ее часто устанавливается жесткая пластина (жесткий центр). Преимуществом плоских мембран является: простота формы и несложность в изготовлении. К недостаткам можно отнести низкие упругостные качества, низкую чувствительность и нелинейность характеристики.

Выпуклые мембранны имеют сферическую или коническую форму (рис. 9.2, б). При возникновении давления на вы-

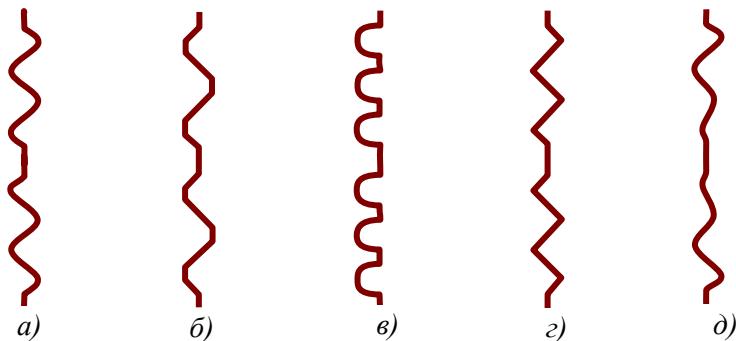


Рис. 9.3. Виды гофрированных мембран: а) синусоидальная; б) трапецидальная; в) плоско-дуговая; г) пильчатая; д) переменно-дуговая

пуклую мембрану с выпуклой стороны деформация сначала плавно нарастает и при достижении критического значения давления мембрана теряет устойчивость и скачком изменяет свой прогиб. Дальнейшее увеличение давления приводит к увеличению деформации. Свойство скачкообразного прогиба выпуклых мембран используется в релейных устройствах. Преимуществом является быстродействие. К недостаткам относятся малая точность, низкая чувствительность и сложность в изготовлении.

Самыми распространенными являются гофрированные мембранны (рис. 9.2, в).

Гофры – это концентрические волны на поверхности мембранны. Гофры (рис. 9.3) бывают синусоидальные (*а*), трапецидальные (*б*), плоско-дуговые (*в*), пильчатые (*г*) и переменные по глубине (*д*).

Крайний гофр называется краевым, и он увеличивает чувствительность мембранны примерно в 3 раза. Мембрана с плоско-дуговым профилем имеет наиболее высокую чувствительность, поэтому эти мембранны применяются для измерения низких давлений.

Наиболее простым в изготовлении является пильчатая мембрана. Они применяются в высотомерах, указателях скорости и расходомерах. Влияние формы профиля на характеристику незначительна, а толщина, из которой изготовлена мембрана, влияет сильно.

Из-за небольшого прогиба и сложности ее крепления в устройствах мембранны применяются относительно редко. Для получения большого прогиба и упрощения конструкции креп-

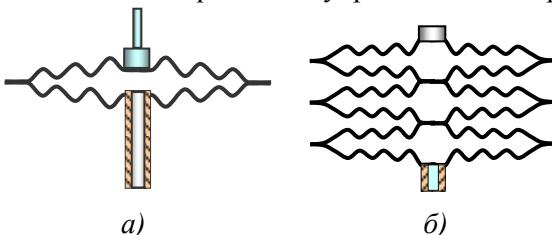


Рис. 9.4. Виды соединений мембрани: *а*) соединение в коробку; *б*) соединение в блок

ления мембранны соединяют в коробки, а коробки в блоки (рис. 9.4, *a*, *b*).

Усилие, с которым мембрана воздействует на препятствие, ограничивающее его перемещение, называется тяговым усилием. Оно определяется формулой:

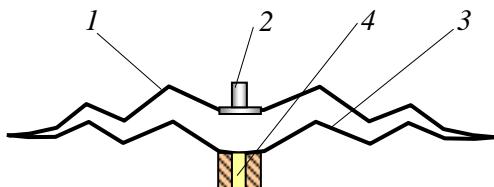
$$Q = pS_{\phi},$$

где  $S_{\phi}$ -эффективная площадь мембранны,  $p$  - давление среды.

На практике эффективная площадь определяется:

$$S_{\phi} = \frac{1}{3\pi} (R^2 + R \cdot r + r^2),$$

где  $R$  - радиус мембранны,  $r$  - радиус жесткого центра.



**Рис. 9.5. Схема коробки с малым объемом: 1- подвижная мембрана; 2- передающий элемент; 3- неподвижная мембрана; 4- подводящая трубка**

Коробки состоят из двух одинаковых гофрированных мембранны, соединенных сваркой, пайкой, завальцовкой. К одной из мембранны через штуцер подводится измеряемое давление. Центр другой используется для передачи движения механизму прибора. Для получения коробки с малым объемом мембранны соединяют так, чтобы гофры были направлены в одну сторону (рис. 9.5). Такая коробка выдерживает большие внешние нагрузки.

В зависимости от способа контакта с измеряемой средой различают манометрические, анероидные и наполненные мембранные коробки. Внутренняя часть манометрических коробок сообщается с измеряемой средой. В анероидных коробках внут-

ренняя часть вакуумируется до давления 13 Па. Наполненные коробки имеют герметичную внутреннюю полость, заполненную газом или жидкостью, например, азот, пары эфира. Такие коробки применяются в термометрах и терморегуляторах. Для увеличения чувствительности и получения больших ходов последовательно соединяют несколько коробок в блок. Изготавливаются из бронзы, нержавеющей стали, сплавов алюминия и т.д. По сравнению с плоскими, гофрированные мембранные имеют большие максимальные деформации, более стабильные упругие свойства, меньшую чувствительность к перекосам нагрузки и монтажа. Они позволяют получать линейную или возрастающую характеристику за счет изменения размеров и форм гофра.

### 9.3. Сильфоны (гармониковая мембрана)

Сильфоном называется тонкостенная цилиндрическая трубчатая оболочка с поперечной кольцевой гофрировкой. Изготавливают в двух вариантах: бесшовные сильфоны из тонкостенных цельнотянутых трубок (рис. 9.6, *а*) и сварные из плоских гофрированных кольцевых мембран (рис. 9.6, *б*). Сварные сильфоны более чувствительны, чем бесшовные, так как могут быть изготовлены с большей глубиной гофров, более стабильны по своим упругим свойствам, а также проще в изготовлении. Однако большое количество сварных швов снижает надежность

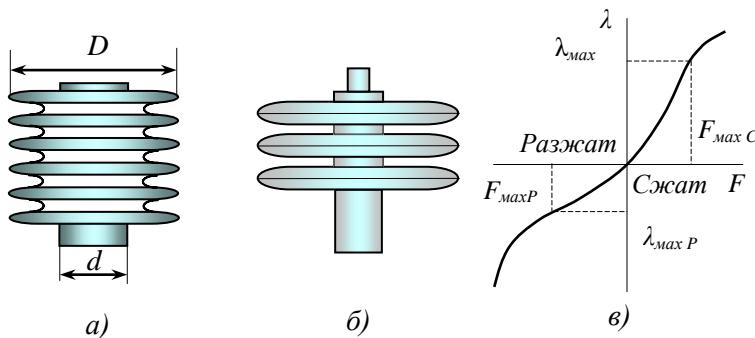


Рис. 9.6. Сильфоны: *а*) бесшовные; *б*) сварные; *в*) характеристика сильфона

таких сильфонов.

Цельнотянутые сильфоны применяют чаще. Сложность технологии бесшовных сильфонов ограничивает выбор материалов, пригодных для их изготовления. Их изготавливают из нержавеющей стали, бериллиевой бронзы, полутомпака. Основными размерами являются: наружный диаметр  $D = 4,5 \div 160$ мм, толщина стенок  $\delta = 0,08 \div 0,25$ мм, число витков волн  $n = 4 \div 16$ . К характеристикам сильфонов относятся:  $k$  – жесткость по осевой силе,  $\lambda$  – рабочий ход,  $p_{\max}$  - максимальное рабочее давление, которое прямо пропорционально толщине стенок и обратно пропорционально диаметру  $D$ . Упругая характеристика сильфона по осевой силе или давлению линейна, но при сжатии жесткость меньше, чем при растяжении, а максимальный рабочий ход при сжатии больше, чем при растяжении. Зависимость между упругой силой и рабочим ходом показана на рис. 18.6, в.

#### 9.4. Трубчатые пружины

Трубчатой пружиной называется тонкостенная трубка, вытянутая в поперечном сечении и изогнутая по дуге окружности.

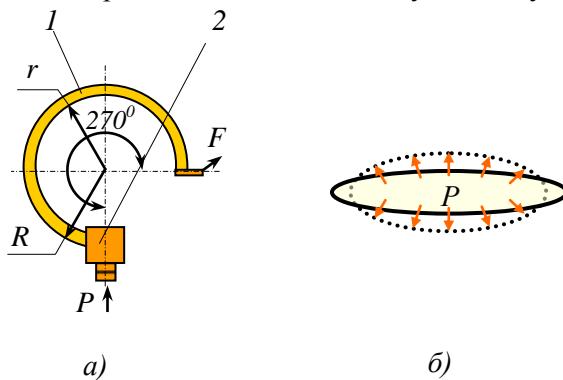
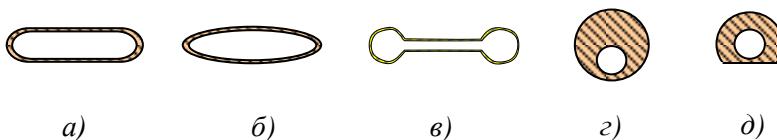


Рис.9.7. Трубчатая пружина манометра: а) схема трубчатой пружины; б) вид трубчатой пружины в поперечном сечении; 1- трубчатая пружина; 2- неподвижный подводящий штуцер

сти (рис. 9.7, *a*). Работа трубы основана на деформации ее по-перечного сечения под действием избыточного давления. Один конец запаян и является свободным, второй конец неподвижен и к нему подводится измеряемое давление  $P$ . При подаче давления во внутреннюю полость трубы ее поперечное сечение стремится принять форму окружности (рис. 9.7, *б*). Вследствие деформации сечения внутренний радиус  $r$  уменьшается и волокна сжимаются. Аналогично внешний радиус  $R$  увеличивается, а волокна растягиваются. В результате возникает момент внутренних сил. Возникающий момент внутренних сил распрямляет трубку. Пружины выпускаются одновитковыми, с разнообразной формой поперечных сечений. Чаще всего выпускаются в виде одновитковых пружин (пружина Бурдона), центральный угол которых не превышает  $270^\circ$ . Их используют для измерения

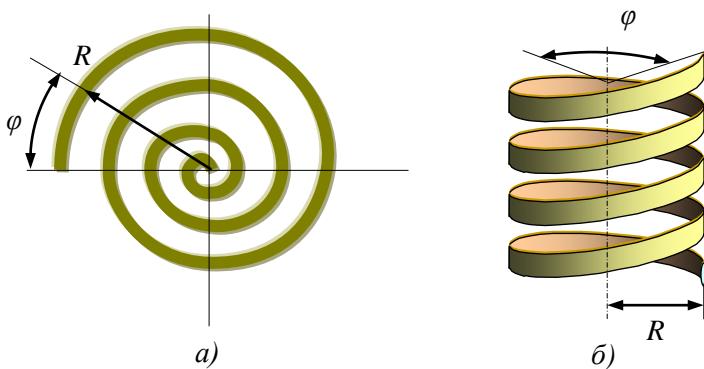


**Рис. 9.8. Виды поперечных сечений трубчатых пружин:**  
*а)* плоскоовальная; *б)* эллиптическая; *в)* в виде восьмерки; *г)* со смещенным каналом; *д)* с лыской

давления в диапазоне 0,05–200 МПа.

Самая распространенная форма – плоскоовальная (рис. 9.8 *а*). Эллиптическое сечение *б*) определяет большую чувствительность пружин. Форма сечения восьмеркой *в*) дает меньшую чувствительность, но большую прочность. Такая сплюснутая форма сечения обеспечивает минимальный внутренний объем, что необходимо для манометрических термометров. Для измерения сверхвысоких давлений до 2000 МПа применяют толстостенные пружины и пружины круглого сечения со смещенным эксцентричным отверстием или лыской (пружины Нагаткина) (*г*, *д*). Величина перемещения свободного конца пружины Бурдона обычно составляет 5–7 мм.

Когда требуется большое перемещение свободного конца или повысить чувствительность, применяют многовитковые



**Рис. 9.9. Многовитковые трубчатые пружины: а) в виде спиральной линии; б) в виде винтовой линии**

трубчатые пружины, выполненные в виде спиральной линии (геликсы) (рис. 9.9, а) или винтовой линии, обычно имеющие 6-9 витков диаметром около 30 мм, (рис. 9.9, б), может перемещаться до 15-25мм. Эти преобразователи в основном применяются в самопищущих устройствах.

#### Контрольные вопросы

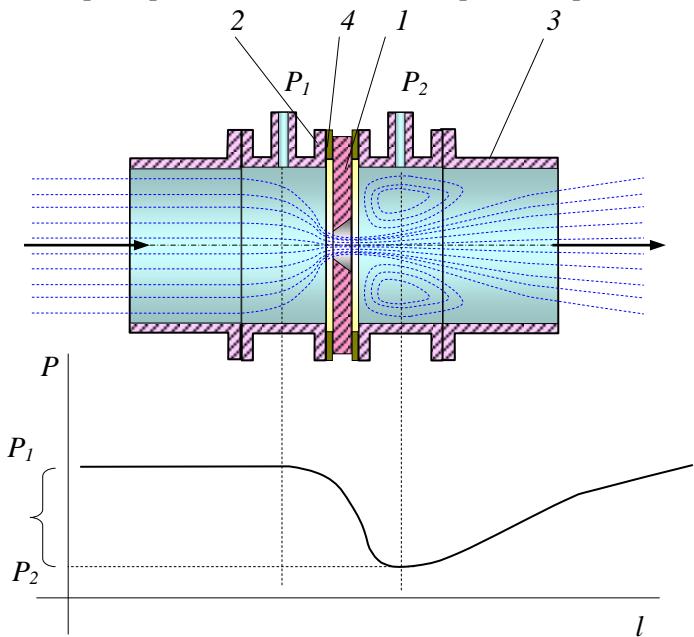
- Покажите возможные пути повышения чувствительности жидкостных манометров.
- От каких величин зависит показание U-образных манометров?
- Что является чувствительным элементом мембранных преобразователей давления?
- Объясните механизм распрямления трубчатых пружин.
- Почему трубчатые пружины для сверхвысоких давлений выполняют с лыской или со смещенным эксцентричным отверстием?
- В каких случаях для контроля давления применяют многовитковые трубчатые пружины?
- Покажите схему контроля уровня жидкости при помощи трубчатых пружин.
- Как устроены манометрические термометры с применением трубчатых пружин или коробок?

## ГЛАВА 10. Преобразователи расхода

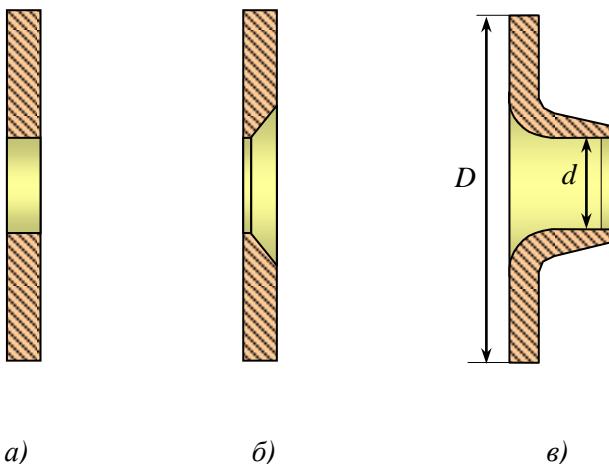
### 10.1. Расходомеры переменного перепада давления Диафрагмы

Диафрагмы относятся к преобразователям переменного перепада, действуют по принципу возникновения перепада давления в сужающем устройстве, устанавливающемся на пути движущейся среды. Перепад давления является функцией расхода. Этим устройством является дисковая диафрагма – тонкий стальной диск с круглым отверстием в центре. Диафрагму 1 вместе с прокладками 4 зажимают между двумя фланцами 2 трубопровода 3, как показано на рис. 10.1.

При протекании вещества через отверстие диафрагмы



**Рис. 10.1. Схема установки диафрагмы для преобразования расхода жидкости или газа: 1- диафрагма; 2- фланцы; 3- трубопровод; 4- прокладки**



**Рис. 10.2. Виды диафрагм: а) – без конического расширения; б) – с коническим расширением к выходу потока; в) – стандартное сопло**

струя сужается, а после прохождения вновь расширяется. Переход определяют трубчатым  $U$ -образным манометром. Возрастание скорости в отверстии определяют из условия

$$Q = V_1 S_1 = V_2 S_2,$$

где  $Q$  – объемный расход вещества;  $V_1$  и  $V_2$  – скорости жидкости до диафрагмы и в отверстии диафрагмы соответственно. Расход в  $\text{м}^3/\text{ч}$  определяют по формуле:

$$Q = 0,0125 \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}},$$

где  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем;  $d$  – диаметр отверстия диафрагмы;  $\rho$  – плотность. В трубопроводах, диаметры которых меньше 50 мм, диафрагмы не применяются, так как в них трение потока о стенки искажает показания. Расходомер, работающий совместно с диафрагмой, называется дроссельным. На рис. 10.2 приведены некоторые разновидности диафрагм.

Отверстие диафрагмы цилиндрической формы со сторо-

ны входа потока имеет прямоугольную кромку. Длина цилиндрического отверстия находится в пределах  $0,005D \div 0,02D$ , где  $D$  диаметр трубопровода. Для расширяющегося отверстия к выходу потока угол наклона, образующий конус к оси диафрагмы, должен лежать в пределах от  $30$  до  $45^\circ$ . В тех случаях, когда толщина диафрагмы меньше  $0,02D$ , можно изготавливать и без конического расширения. Их обычно применяют для больших диаметров трубопроводов и при небольших давлениях протекающей среды.

Стандартное сопло может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром больше  $50$  мм. Профильная часть отверстия сопла со стороны входа потока должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг радиусами  $0,2d$ , где  $d$  – внутренний диаметр сопла.

На выходе цилиндрическая часть отверстия сопла должна заканчиваться расточкой. Выходная кромка должна быть острой и не должна иметь закруглений, фасок, заусенцев и т. п.

Кроме расходомеров переменного перепада при небольших перепадах широко применяются расходомеры постоянного перепада, приведенные ниже.

## 10.2. Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры

К расходомерам постоянного перепада давления относятся ротаметры, являющиеся расходомерами обтекания. Они предназначены для измерения плавно изменяющегося объемного расхода однородных потоков чистых и слабозагрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями инородных частиц.

Ротаметр в простейшем виде состоит из **вертикальной** конусной стеклянной трубы 1, внутри которой находится чувствительный элемент 2, выполненный в виде поплавка (рис. 10.3). Для обеспечения устойчивой работы (для создания гирокомического эффекта) поплавка верхний его обод снабжен каналами с крутым наклоном. Под действием потока жидкости или газа поплавок вертикально перемещается и одновременно

приходит во вращательное движение и центрируется в середине потока.

Перепад давления на поплавке определяется его массой. При постоянной массе поплавка площадь кольцевого сечения

между внутренними стенками трубы и поплавком пропорциональна расходу вещества, протекающего по трубке.

Допустим, что под действием потока поплавок поднялся на некоторую высоту и остановился во взвешенном состоянии. При полном погружении в измеряемую среду масса поплавка составит

$$m = V(\rho_n - \rho),$$

где  $V$  – объем поплавка;  $\rho_n$  – плотность материала из которого изготовлен поплавок;  $\rho$  – плотность про-

**Рис. 10.3. Схема ротаметра:** 1- коническая трубка; 2- вращающийся поплавок

текущей среды.

В положении равновесия сила, создаваемая средой, протекающей через ротаметр и действующей снизу, уравновешивается силой, действующей сверху. Тогда можно написать равенство:

$$m = V(\rho_n - \rho)g \cdot S_0(P_1 - P_2) = 0,$$

где  $S_0$  – площадь сечения поплавка в месте наибольшего диаметра (Мидлево сечение);  $P_1$  и  $P_2$  – давления среды до и после поплавка;  $g$  – ускорение свободного падения.

Отсюда перепад давления на поплавке получится:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{S_0}V(\rho_n - \rho)g. \quad (10.1)$$

Видно, что перепад давления от расхода не зависит, т.е. является постоянной величиной.

Скорость измеряемой среды  $v$  в кольцевом зазоре ротаметра будет

$$v = \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}$$

или

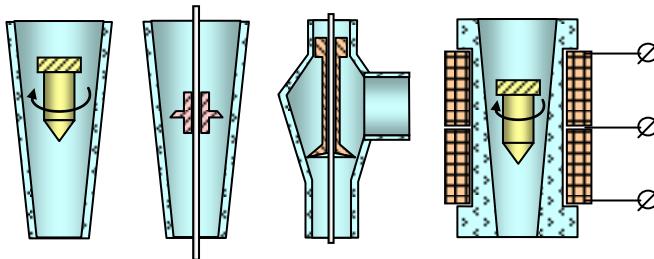


Рис. 10.4. Разновидности ротаметров

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{v^2 \rho}{2} . \quad (10.2)$$

Приравнивая уравнения (10.1) и (10.2), найдем скорость потока в зазоре

$$v = \sqrt{2gV(\rho_n - \rho)/\rho S_0} .$$

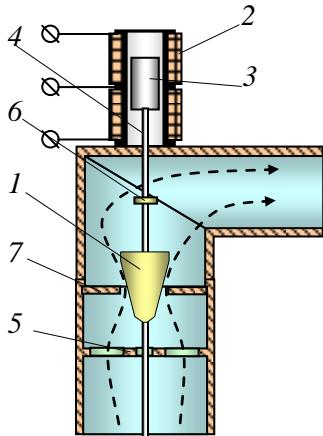
Зная  $v$ , а также площадь кольцевого сечения  $S_k$  при данном положении поплавка, можно определить объемный расход измеряемой среды  $Q$ :

$$Q = \varphi S_k \sqrt{2gV(\rho_n - \rho)/\rho S_0} ,$$

где  $\varphi$  – коэффициент расхода, который определяется экспериментально. На рис. 10.4 представлены некоторые конструктивные разновидности исполнения ротаметров

В визуальных ротаметрах расчет отсчитывают по верхней горизонтальной плоскости поплавка. Шкалу ротаметра градируют экспериментально.

Для дистанционного измерения расхода используют расходомеры с электрической или пневматической передачей показаний на расстояние. Ротаметр с индуктивным преобразователем для дистанционной передачи информации приведен на рис. 10.5. Поплавок жестко соединен с сердечником дифференциально-трансформаторного индуктивного преобразователя. Перемещение поплавка вверх приводит к увеличению взаимной индукции катушек преобразователя. Конусная форма поплавка исключает конусную мерительную трубку. Трубка заменена диафрагмой. В промышленности применяют ротаметры типа РМ, РЭ, РП. РМ – ротаметр местного показания расхода, РЭ –



**Рис. 10.5. Схема ротаметра с индуктивным преобразователем:** 1- поплавок; 2– катушка преобразователя; 3– сердечник индуктивного преобразователя; 4– штанга; 5– нижний ограничитель поплавка; 6– верхний ограничитель; 7– диафрагма

ротаметр с электрическим преобразователем для передачи информации на расстояния, РП – ротаметр с пневматическим преобразователем. Относительные погрешности ротаметров, предназначенных для измерения расхода жидкости и для газа, определяют по формулам:

$$\delta_{ж} = \frac{Q_u - Q_d}{Q_b} \cdot 100\%$$

$$\delta_{г} = \frac{Q_u - Q_d}{Q_b} \cdot 100\%,$$

где  $Q_b$  – значение расхода, соответствующее верхнему пределу измерений;  $Q_u$  – значение расхода по шкале;  $Q_d$  – действительное значение расхода.

### 10.3. Индукционный расходомер

В настоящее время серийно выпускают электромагнитные (индукционные) расходомеры. Работа основана на измерении,

пропорциональном расходу электродвижущей силы, индукированной в потоке электропроводной жидкости под действием магнитного поля. Трубопровод, по которому протекали проводящая жидкость, расположен между полюсами электромагнита перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля (рис. 10.6). Под действием силы Лоренца поток ионов прижимается к левому электроду. Сила Лоренца определяется формулой:

$$F = BeV,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля;  $e$  – заряд ионов;  $V$  – средняя скорость движения ионов. Напряженность поля между боковыми электродами

$$E = U/d,$$

где  $d$  – расстояние между электродами;  $U$  – разность потенциалов между боковыми электродами. Следовательно,

$$F = \frac{eU}{d}.$$

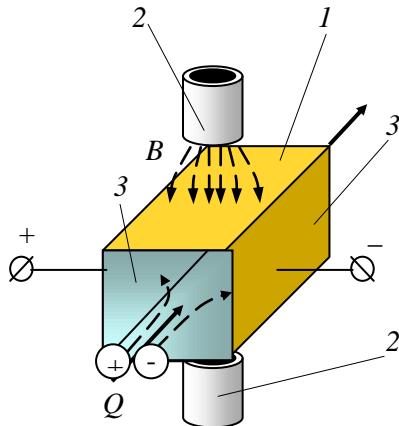
Тогда

$$BeV = \frac{eU}{d}$$

откуда возникшая поперечная разность потенциалов имеет вид:

$$U = Bvd.$$

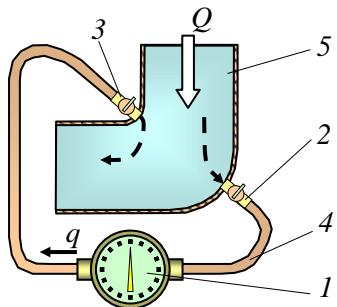
Преобразователи расходомеров выпускают диаметром от 10 до 500 мм и расходы от  $8 \cdot 10^{-5}$  до  $1,1 \text{ м}^3/\text{с}$ , освоен выпуск преобразователей диаметром до 1000 мм.



**Рис. 10.6. Схема индукционного расходомера: 1- диэлектрический трубопровод; 2- магниты; 3- электроды**

## 10.4. Парциальный расходомер

Парциальные расходомеры позволяют измерять большие расходы жидкости сравнительно простыми средствами.



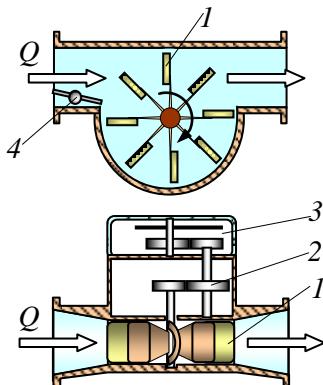
**Рис. 10.7. Схема парциального турбинного расходомера:**  
1—турбинный расходометр, 2—штуцер входной, 3- штуцер выходной, 4—соединительные трубы, 5—трубопровод

Колено создает перепад давления, необходимый для преодоления сопротивления. Диаметр обводной трубы шунта и перепад давления подбирают таким образом, чтобы через обводную трубку протекало около 1% основного потока  $Q$ .

На обводной трубке устанавливают пробковые краны для возможности отключения измерителя. Парциальные расходомеры тарируют после установки на месте измерений при пяти – восьми различных расходах.

## 10.5. Счетчик с тангенциальной турбинкой

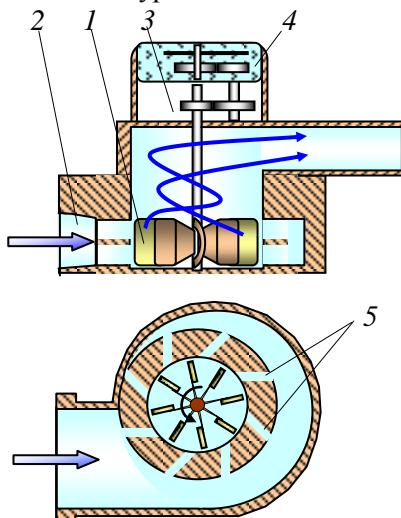
Счетчики предназначены для измерения суммарного объема или массы вещества за определенный промежуток времени. Применяют скоростные и объемные счетчики количества. Принцип действия скоростных счетчиков основан на том, что



**Рис. 10.8. Схема одноструйного счетчика с тангенциальной турбинкой: 1- турбинка; 2- редуктор; 3- счетчик; 4- конфузор**

поток вещества, проходя через счетчик, приводит во вращение чувствительный элемент – турбинку.

Число оборотов турбинки пропорционально расходу вещества. Вмонтированный счетный механизм суммирует расход вещества. Расположение турбинок в счетчике для применения



**Рис. 10.9. Схема многоструйного крыльчатого счетчика: 1- крыльчатка; 2- конфузор; 3- редуктор; 4- счетный механизм; 5- струеобразовательные каналы**

малых расходов тангенциаль но к потоку, а для измерения больших расходов – аксиально к потоку. На рис. 10.8 показана схема одноструйного счетчика с тангенциальной турбинкой. Поток вещества (жидкости) поступает через патрубок в выравниватель поля скоростей (конфузор) 4. Через конфузор вещество воздействует тангенциально на лопасти турбинки 1 и вращает его вокруг вертикальной оси. Вращение через редуктор 2 передается на счетный механизм 3. Наиболее широко тангенциальную турбинку применяют в счетчиках для измерения расхода воды.

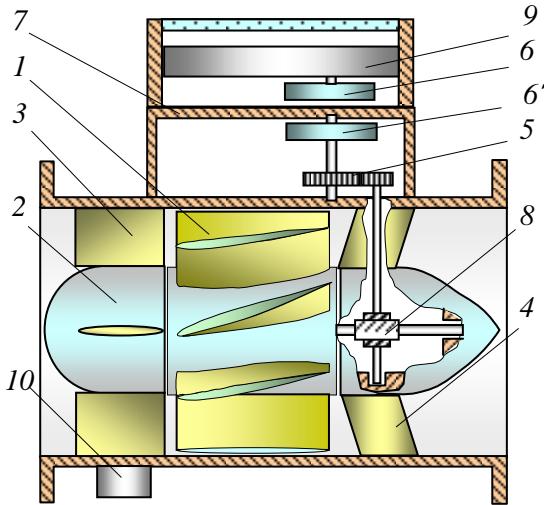
В многоструйном счетчике (рис. 10.9) вещество через входной патрубок поступает в нижнюю полость корпуса, проходит через нижний ряд отверстий и несколькими струями попадает на лопасти крыльчатки, приводя ее во вращение. Далее вещество по спирали поднимается вверх вдоль оси вертушки и через верхний ряд отверстий поступает в верхнюю часть корпуса, а затем в выходной патрубок. В многоструйных счетчиках вращение крыльчатки передается счетному механизму так же, как и у одноструйных.

## 10.6. Счетчик с аксиальной турбинкой

В счетчиках с аксиальной турбинкой (рис. 10.10) турбинка 1 представляет собой цилиндр с лопастями, прикрепленными по винтовой линии. Перед турбинкой установлен обтекатель 2,держивающийся на струевыпрямителях 3.

Один или два из струевыпрямителей могут поворачиваться для регулирования скорости вращения турбинки. Задний опорный подшипник турбинки установлен в кронштейне, там же расположена червячная передача 8, передающая вращение от турбинки 1 к редуктору 5. Верхний конец оси червячного колеса через пару сменных шестерен соединен с магнитной муфтой 6. Вторая полумуфта 6 отделена от первой водонепроницаемой диамагнитной перегородкой 7. Величину расхода определяют по показанию счетного механизма 9. Регулятор 10 необходим для настройки преобразователя перед применением.

Число оборотов турбинки пропорционально средней скорости потока жидкости и обратно пропорционально шагу лопасти:



**Рис. 10.10. Схема счетчика с аксиальной турбинкой:** 1 – аксиальная турбинка; 2 – обтекатель; 3 - струевыпрямитель; 4 – кронштейн; 5 – редуктор; 6 и 6' - магнитные муфты; 7 - диамагнитная перегородка; 8 - червячная передача; 9 - счетный механизм; 10 – регулятор

$$n = k \frac{v_{cp}}{l}, \quad (10.3)$$

где  $n$  – число оборотов турбинки в секунду;  $v_{cp}$  – средняя скорость потока измеряемой среды в м/с;  $k$  – постоянный коэффициент для данного счетчика;  $l$  – шаг лопастей турбинки в метрах.

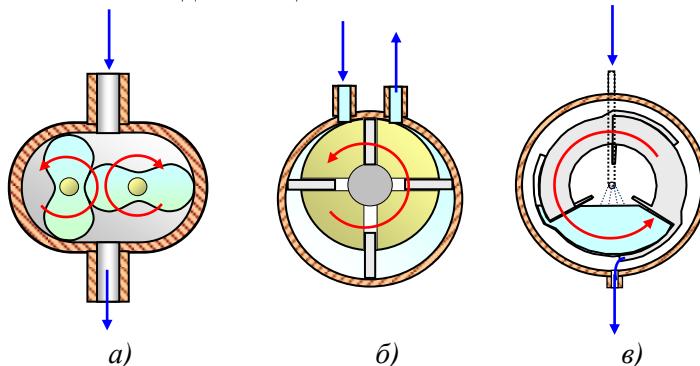
Преобразив уравнение (10.3) и подставив в него значение скорости  $v_{cp} = \frac{Q}{F}$ , получим:

$$n = \frac{kQ}{Fl},$$

где  $Q$  - объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $F$  - площадь сечения прибора,  $\text{м}^2$ .

Для обеспечения постоянства метрологических характеристик прибора необходимо, чтобы направление потока жидкости

сти было параллельно оси турбинки, так как незначительные отклонения в движении потока влияют на число оборотов. Необходимо, кроме того, чтобы перед прибором был прямой участок трубы длиной не менее  $5D$ , где  $D$  – диаметр трубы. Наряду с расходомерами аксиального типа широко применяются скоростные счетчики, которые называются тахометрическими. Тахометрические расходомеры пригодны для измерения объема и массы жидких веществ.



**Рис. 10.11. Схемы некоторых объемных счетчиков: а) ротационный; б) пластинчатый; в) барабанный**

Наиболее широкое применение находят скоростные турбинные расходомеры состоящие из турбинки, передней и задней направляющей, индуктивного или индукционного преобразователя. Информацию о частоте вращения турбины можно передавать в счетный механизм электромагнитным способом. На рис. 10.11 приведены некоторые варианты объемных расходомеров.

## 10.7. Счетчик газа

Счетчик состоит из узла турбинного преобразователя расхода газа с узлом внутренней магнитной полумуфты и узла отсчетного устройства. Он предназначен для измерения объема плавно меняющихся потоков газа, очищенных от механических примесей с кинематической вязкостью от 5 до 15 Ст, с плотно-

стью при нормальных условиях не менее  $0,7 \text{ кг}/\text{м}^3$  (рис. 10.12).

*Для измерения расхода кислорода счетчики не применяются.*

Принцип действия основан на использовании энергии потока газа для вращения чувствительного элемента – турбинки. При взаимодействии потока газа с турбинкой она вращается со скоростью, пропорциональной скорости измеряемого газа.

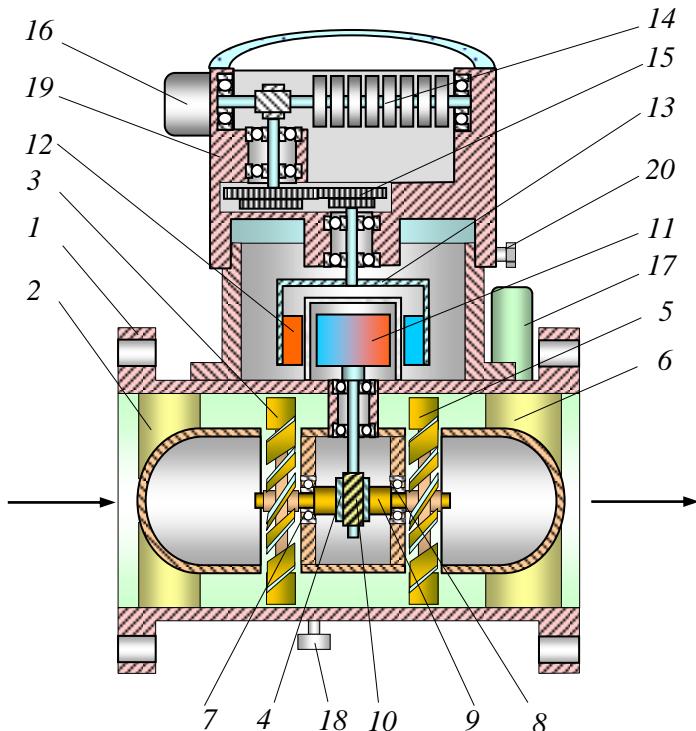


Рис. 10.12. Схема счетчика газа: 1- корпус; 2- передний струевыпрямитель; 3- передняя турбинка; 4- узел сигнализатора; 5- задняя турбинка; 6- задний струевыпрямитель; 7 и 8- подшипники; 9- вал турбинок; 10- зубчатое колесо; 11- внутренняя магнитная полумуфта; 12- внешняя магнитная полумуфта; 13- корпус муфты; 14- барабаны отсчетного устройства; 15- редуктор; 16- индукционный преобразователь вращения; 17- масляный насос; 18- пробка; 19- корпус счетного механизма; 20- фиксатор

Далее число оборотов турбинки с помощью механического редуктора и магнитной муфты подсчитывается на интегрирующем (суммирующем) устройстве, показывающем объемное количество газа, прошедшее через счетчик за время измерения.

В цилиндрическом корпусе 1 счетчика в проточной части последовательно по потоку расположены передний направляющий аппарат 2, первая турбинка 3, узел сигнализатора 4, вторая турбинка 5, задний струевыпрямляющий аппарат 6. В узле сигнализатора на подшипниках 7 и 8 установлен вал 9, выполненный заодно с червяком. Вал кинематический связан с зубчатым колесом 10, которое связано с внутренней магнитной полумуфтой 11. Внешняя полумуфта 12 магнитной муфты закреплена в корпусе 13, часть которого выполнена в виде вала, устанавливаемого на подшипниках. Вращение внешней полумуфты и колес механического редуктора передается на цифровые барабаны 14 отсчетного устройства счетчика. В конструкции счетчика предусмотрена сменная пара шестерен 15, с помощью которой при градуировке производится подбор необходимой редукции для получения на цифровых барабанах соответствующих показаний.

Для проведения градуировки и поверки счетчика в конструкции счетного устройства предусмотрена индуктивная катушка 16 для преобразования оборотов магнитной муфты (турбинки) в электрические импульсы, число которых на каждый оборот турбинки значительно больше оборотов первого барабана отсчетного устройства. Этим достигается повышение точности измерения объема газа, прошедшего через счетчик.

Снаружи на корпусе счетчика установлен масляный насос 17 с маслопроводами для подачи смазки к подшипникам турбинки при периодическом обслуживании прибора в эксплуатации.

Отсчетное устройство 8 – разрядный роликовый механизм, низший разряд которого связан с последним зубчатым колесом редукторного механизма. Механизм редуктора и счетное устройство размещены в одном корпусе 19, снабженном смотровым окном под цифровые ролики.

Корпус отсчетного устройства 19 имеет возможность разворачиваться вокруг вертикальной оси для удобства считывания

показаний счетчика в зависимости от места расположения прибора на трубопроводе. После установления положения корпус фиксируется в этом положении винтом 20.

Счетчик устанавливают соосно на горизонтальном участке трубопровода. Участки труб должны быть равны диаметру прибора, а длина - 10 диаметрам перед счетчиком и не менее 5 диаметров - после него. Угловое отклонение оси корпуса счетчика от горизонтали - не более 10°.

Объем газа, прошедший через счетчик, определяется по формуле:

$$V_c = V_o \frac{P_b + P_o}{P_b + P_1 - 0,5\Delta P} \cdot \frac{t_c + 273}{t_o + 273},$$

где  $V_c$  - объем газа, определяемый по образцовому измерительному средству, м<sup>3</sup>;  $P_b$  - барометрическое давление, Па;  $t_o$  - температура в образцовом приборе, °C;  $t_c$  - температура газа на входе счетчика, °C;  $P_o$  - избыточное давление в образцовом приборе Па;  $P_1$  - избыточное давление перед счетчиком Па;  $\Delta P$  - перепад давления на счетчике, Па.

Относительная погрешность счетчика определяется по формуле:

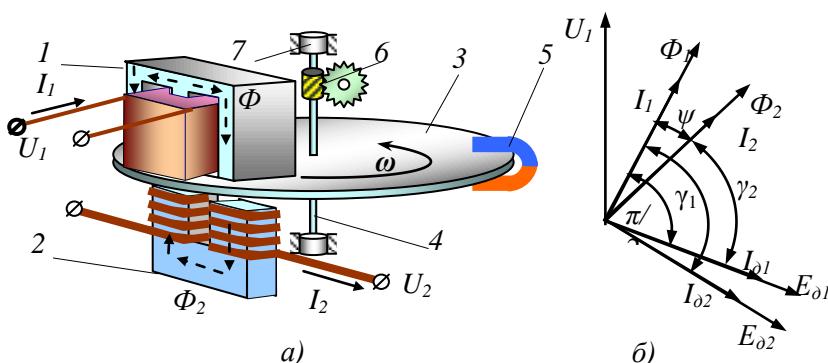
$$\delta = \frac{V_c - V_c}{V_c} \cdot 100\%,$$

где  $\frac{N}{K_{cm}} = V_c$  - объем газа, прошедший через испытуемый прибор, м<sup>3</sup>;  $K_{cm}$  - коэффициент счетчика, Гц·с/м<sup>3</sup>;  $N$  - количество импульсов по показанию частотомера, полученных с генератора импульсов.

## 10.8. Счетчики электрической энергии

Принцип действия индукционных приборов (счетчиков электрической энергии) основан на взаимодействии двух или нескольких переменных магнитных потоков с индуцированными ими токами в подвижной части механизма.

Механизм прибора и схема включения прибора представлены на рис. 10.13 и рис. 10.14 соответственно. Механизм прибора рис. 10.13, а) состоит из двух неподвижных трехстержневых магнитопроводов с одной катушкой и П-образный – с



**Рис. 10.13. Схема устройства (а) и векторная диаграмма (б) индукционного прибора (счетчика): 1- неподвижный трехстержневой магнитопровод; 2- неподвижный П- образный магнитопровод; 3- подвижный диск; 4- ось; 5- постоянный магнит; 6- червячная передача счетного механизма; 7- опорный подшипник диска**

двумя последовательно соединенными катушками алюминиевого диска, жестко укрепленного на оси.

При подключении прибора в цепь переменного тока, токи в катушках 1 и 2 возбуждают переменные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , которые совпадают по фазе с соответствующими токами (рис. 10.13, б). Магнитные потоки, пересекая диск, индуцируют в нем переменные ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , отстающие от своих потоков на угол  $\pi/2$ . Под действием ЭДС в диске наводятся два вихревых тока  $I_{d1}$  и,  $I_{d2}$ , которые совпадают по фазе с соответствующими ЭДС, так как диск представляет собой активное сопротивление.

В результате втягивания контура тока  $I_{\Delta 1}$  потоком  $\Phi_2$  и выталкивания контура тока  $I_{\Delta 2}$  потоком  $\Phi_1$  возникают два противоположно направленных момента, которые действуют на подвижный диск.

Их направления определяются по правилу левой руки, а мгновенные значения – по известному соотношению при взаимодействии тока и потока:

$$m_{t1} = k_1 \Phi_1 i_{\Delta 2} \text{ и } m_{t2} = k_2 \Phi_1 i_{\Delta 1},$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты пропорциональности.

Если переменные магнитные потоки изменяются по закону

$$\Phi_1 = \Phi_{m1} \sin \omega t \text{ и } \Phi_2 = \Phi_{m2} \sin(\omega t - \phi),$$

а из векторной диаграммы (рис. 10.13, б) с учетом фазовых сдвигов между векторами  $\dot{I}_{\Delta 1}$  и  $\Phi_2$ , а также  $\dot{I}_{\Delta 2}$  и  $\Phi_1$

$$i_{\Delta 1} = I_{m\Delta 1} \sin(\omega t - \gamma_1) \text{ и } i_{\Delta 2} = I_{m\Delta 2} \sin(\omega t - \gamma_2),$$

то средние значения моментов можно рассчитать по формулам:

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_{t1} dt = \frac{1}{T} k_1 \Phi_{m1} I_{m\Delta 2} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \gamma_1) dt = k_1 \Phi_1 I_{\Delta 2} \cos \gamma_1.$$

Поскольку  $\gamma_1 = \pi/2 + \psi$ ,  $\gamma_2 = \pi/2 - \psi$  результирующий момент, действующий на диск,

$$\begin{aligned} M_{\text{рп}} &= -M_1 + M_2 = -k_1 \Phi_1 I_{\Delta 2} \cos(\pi/2 + \psi) + k_2 \Phi_2 I_{\Delta 1} \cos(\pi/2 - \psi) = \\ &= k_1 \Phi_1 I_{\Delta 2} \sin \psi + k_2 \Phi_2 I_{\Delta 1} \sin \psi = (k_1 \Phi_1 I_{\Delta 2} + k_2 \Phi_2 I_{\Delta 1}) \sin \psi. \end{aligned}$$

Если учесть, что токи, наводимые потоками в дисках, связаны с соответствующими потоками соотношениями

$$I_{\Delta 1} = k_3 f \Phi_1, I_{\Delta 2} = k_4 f \Phi_2,$$



Рис. 10.14. Схема включения однофазного счетчика: 1- обмотка напряжения; 2- обмотка тока

где  $f$ - частота изменения магнитных потоков;  $k_3$  и  $k_4$  коэффициенты пропорциональности.

Тогда выражение для результирующего момента примет вид:

$$M_{\text{рп}} = (k_1 k_4 f \Phi_1 \Phi_2 + k_2 k_3 f \Phi_1 \Phi_2) \sin \psi$$

или

$$M_{\text{рп}} = K f \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi, \quad (10.4)$$

где  $K = k_1 k_4 + k_2 k_3$ .

Анализ уравнения (10.4) показывает, что максимального значения вращающий момент достигает при угле сдвига фаз между потоками  $\psi = \pi/2$ .

Для создания тормозного момента и обеспечения равномерного вращения диска в механизме предусмотрен постоянный магнит 5 (рис. 10.13, а). Поле, создаваемое постоянным магнитом, наводит во вращающемся диске ЭДС, в результате чего возникает вихревой ток

$$I_B = k_1 \Phi_{\text{п}} \omega,$$

где  $k_1$ - коэффициент пропорциональности;  $\Phi_{\text{п}}$ - магнитный поток постоянного магнита;  $\omega$ - угловая скорость вращения диска. Взаимодействие тока  $I_B$  с потоком  $\Phi_H$  вызывает торможение диска моментом

$$M_T = k_2 \Phi_{\text{п}} I_B.$$

После преобразования этой формулы получаем

$$M_T = k_1 k_2 \Phi_{\text{п}}^2 \omega = k_T \Phi_{\text{п}}^2 \omega,$$

где  $k_T = k_1 k_2$ .

Таким образом, тормозной момент прямо пропорционален угловой скорости вращения диска. Основные достоинства индукционных приборов — большой вращающий момент, слабые влияния внешних магнитных полей и большая перегрузочная способность. Вместе с тем индукционные приборы пригодны только для переменного тока, имеют невысокую точность, большое собственное потребление мощности и на их показания оказывает влияние изменение температуры окружающей среды и частоты тока.

В случае, когда потребляемая мощность превышает максимальные значения измерения мощности счетчика, счетчики включают через трансформаторы тока  $TT$  и напряжения  $TH$ . Схема подключения однофазного счетчика с измерительными трансформаторами представлена на рис. 10.15.

Для измерения энергии в трехфазных цепях можно использовать метод одного, двух или трехфазных счетчиков либо один трехфазный счетчик. Энергия, израсходованная в цепи, определяется по формуле:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad (10.5)$$

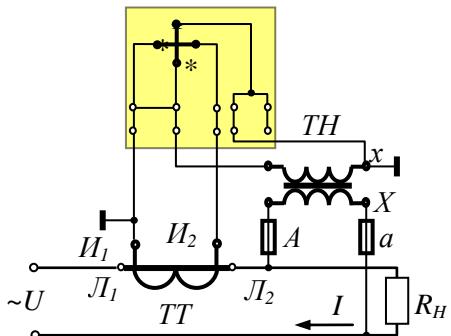
$$\text{где } P = U_{1\phi} I_{1\phi} \cos\varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \cos\varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \cos\varphi_3. \quad (10.6)$$

При полной симметрии системы уравнение (10.5) с учетом (10.6) примет вид:

$$A = 3 \int_{t_1}^{t_2} U_\phi I_\phi \cos\varphi dt = \sqrt{3} \int_{t_1}^{t_2} U_\pi I_\pi \cos\varphi dt.$$

При использовании измерительных трансформаторов для расширения диапазонов измерения силы тока и напряжения счетчиков энергии пользуются теми же правилами, что и при включении ваттметров.

Наиболее распространен однофазный счетчик киловатт-часов типа СО-И449. Он предназначен для учета активной энергии в цепях с частотой 50 или 60 Гц. Выпускаются приборы на номинальные токи 2,5; 5,0; 10,0 и 20 А и напряжения 110, 120, 127, 220, 230, 240 и 250 В. Класс точности приборов 2,0.



**Рис. 10.15. Схема включения счетчика с добавлением трансформатора тока  $TT$  и трансформатора напряжения  $TH$**

Трехфазный счетчик электрической энергии представляет собой двухэлементный (для трехпроводных цепей) или трехэлементный (для четырехпроводных цепей) индукционный прибор. Подвижная часть такого прибора выполнена в виде двух или трех дисков, укрепленных на общей оси. Вращающий момент, действующий на подвижную часть, равен алгебраической сумме моментов, создаваемых каждым элементом. Двухэлементные приборы с одним диском и трехэлементные с двумя дисками не применяются из-за сложности устранения взаимных влияний магнитных систем.

В зависимости от назначения промышленность выпускает индукционные счетчики различных типов: активной энергии однофазные СО (счетчик однофазный), трехфазные САЗ (для трехпроводных цепей) и СА4 (для четырехпроводных цепей); реактивной энергии СР3 (для трехпроводных цепей) и СР4 (для четырехпроводных цепей), а также счетчики специального назначения: например, двухтарифные, фиксирующие потребляемую энергию в дневное и ночное время, снабженные фотоэлементом или часовым механизмом. Счетчики реактивной энергии для однофазных цепей не выпускают.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите, какие расходомеры относятся к показывающим?
2. Чем отличаются интегрирующие счетчики от показывающих и перечислите их.
3. Каким образом без замены диафрагмы можно увеличить чувствительность расходомера переменного перепада?
4. Что является чувствительным элементом расходомеров переменного перепада давления?
5. Объясните принцип работы расходомера постоянного перепада давления.
6. Что является чувствительным элементом расходомеров постоянного перепада давления?
7. Покажите схему контроля больших расходов при помощи маломощного турбинного расходомера.
8. Перечислите преимущества и недостатки счетчиков с крыльчатой и аксиальной турбинками.

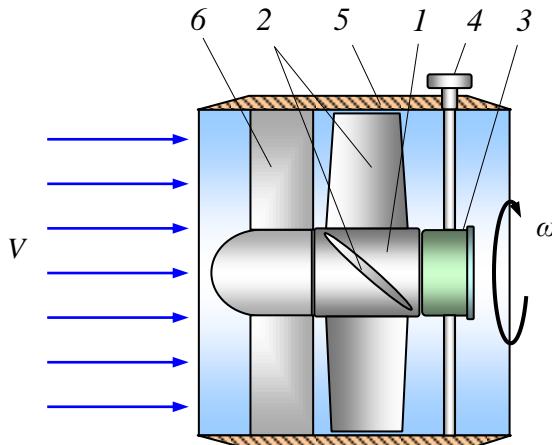
9. Каким образом осуществляется кинематическая связь между турбинкой и счетным механизмом в счетчиках жидкостей и газов?
10. Перечислите возможные причины отказа счетчиков жидкости и газа.
11. К какому типу, показывающему или суммирующему, относится счетчик электрической энергии?
12. Как называется прибор, показывающий электрическую энергию?
13. Что является чувствительным элементом индукционных счетчиков электрической энергии?
14. Изменится ли вращение диска счетчика, если поменять начало с концом токовой обмотки 2 (рис. 10.14), и почему?
15. С чем связано добавление трансформатора тока и напряжения?

## ГЛАВА 11. Преобразователи скорости воздушного потока

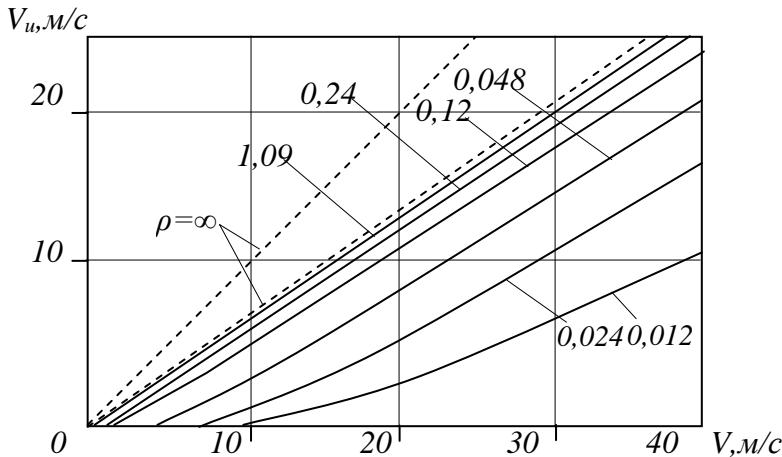
### 11.1. Крыльчатый анемометр

Для определения скорости движения воздуха в диапазоне от 0,4 до 15 м/с применяют крыльчатые анемометры (рис. 11.1).

В идеальном случае в анемометрах с крыльчаткой между скоростью ветра  $V$  и окружной скоростью крыльчатки  $V_u$  существует зависимость  $V_u = V \cdot \text{tg} \alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона между положением крыла и направлением набегающего потока. В соответствии с рис. 11.2, на котором нанесены тарировочные кривые для воздуха различной плотности, трение крыльчатки допускает трогание при определенной скорости набегания и вызывает значительные погрешности, увеличивающиеся с уменьшением плотности воздуха или газа. Крыльчатый анемометр состоит из колеса 1 с алюминиевыми крыльями 2, расположенными под углом  $45^0$  к плоскости, перпендикулярной оси колеса. Ось коле-



**Рис. 11.1. Схема крыльчатого анемометра:** 1- колесо анемометра; 2- крыльчатки колеса; 3- счетный механизм; 4- рычаг выключения счетчика; 5- корпус анемометра; 6- направляющие



**Рис. 11.2. Тарировочные кривые для воздуха различной плотности: по оси абсцисс – скорость ветра; по оси ординат – окружная скорость крыльчатки анемометра**

са соединена со счетчиком оборотов 3. При помощи рычажка 4 счетчик оборотов может включаться и выключаться. Под воздействием проходящего через колесо потока воздуха оно вращается. Движение колеса передается стрелке, движущейся по циферблату.

При помощи направляющих 6 колесо с крыльчатками и счетный механизм установлены в центре полого цилиндрического корпуса 5. Из-за наличия кожуха, окружающего крыльчатку, истинная характеристика анемометра при большой плотности газа ниже идеальной тарировочной прямой. Для снижения трения ротор устанавливают на рубиновых или динамических жидкостных подшипниках.

При измерении скорости крыльчатые анемометры устанавливают так, чтобы их ось была параллельна потоку воздуха. После этого одновременно включают механизм отсчета и секундомер. По истечении 0,5 – 1 мин секундомер и анемометр одновременно останавливают. Затем находят разность начальных и конечных показаний и устанавливают число оборотов за

одну секунду, после чего по тарировочному графику определяют скорость потока в м/с.

## 11.2. Чашечный анемометр

В диапазоне от 1 до 35 м/с применяют чашечные анемометры (рис. 11.3). В чашечном анемометре крылья заменены чашечками. Этот анемометр состоит из колеса 1 в виде креста с четырьмя полушиариями 2, счетного механизма 3, который воспринимает вращение колеса. Колесо 1 помещено в защитное крестообразное устройство 4, жестко связанное с корпусом счетного механизма 3. В связи с большой инерцией в этом приборе им можно измерять лишь скорости, превышающие 1 м/с. Погрешность измерения этим анемометром не превышает 0,2 м/с.

Измерение при помощи чашечных анемометров аналогично крыльчатым, только ось вращения колеса должна быть перпендикулярна потоку воздуха.

Принцип действия чашечного анемометра Робинзона ос-

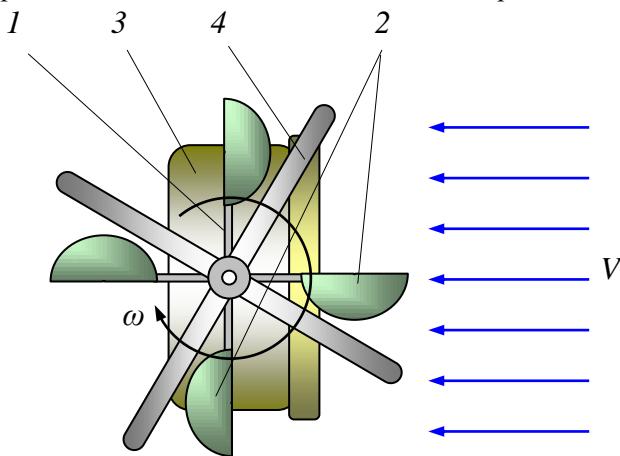
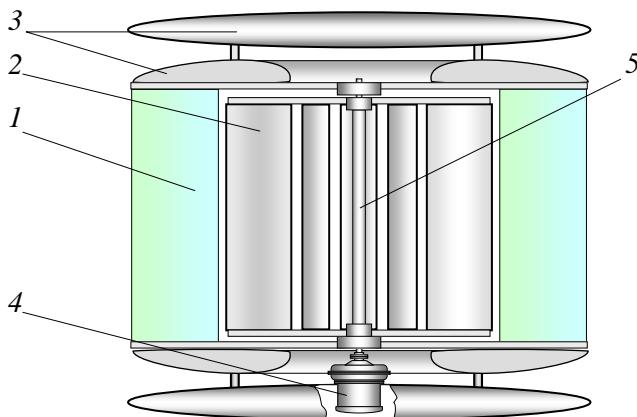


Рис. 11.3. Схема чашечного анемометра: 1- колесо анемометра; 2- полушиария колеса; 3- счетный механизм; 4- защитное устройство

нован на том, что сопротивление, направленное на вогнутую поверхность чаши, примерно в три раза больше сопротивления, возникающего при обдуве выпуклой части. Если сопротивление возрастает пропорционально квадрату скорости ветра, то окружная скорость чашки анемометра должна быть равной примерно 1/4 скорости ветра. Так как сопротивление зависит от числа Рейнольдса –  $Re$ , то при больших скоростях необходима индивидуальная градуировка прибора. Обычные ручные чашечные анемометры для измерения скорости ветра с роторной измерительной системой обладают порогом трогания 2 м/с, диапазоном измерения до 30 м/с и предельной точностью 2,5% от верхнего значения диапазона. Приборы с электрической системой передачи обладают порогом трогания 1,2 м/с и имеют переключаемые диапазоны измерения до 60 м/с.

### 11.3. Анемометр с воздухозаборниками

На базе новых исследований и изобретений создан новый и более совершенный анемометр чашечного типа (рис. 11.4). Имеется высокоеффективный анемометр роторного типа с вер-



**Рис. 11.4. Схема анемометра с направляющими статора: 1 – направляющая воздухозаборника; 2 – лопасть ротора; 3 – обтекатель; 4 – преобразователь частоты вращения ротора анемометра (тахогенератор); 5 – вал ротора**

тикальными воздухозаборниками.

Эффективность достигается за счет того, что в анемометре, содержащим статор 1 с воздухозаборниками 2 в виде сужающихся сопел, расположенных по окружности, ротор 3 с лопастями 4 расположен внутри воздухозаборника, а его лопатки в сечении выполнены примерно в 1/3 части окружности. Концы лопаток прикреплены к верхнему и нижнему кольцам (обтекателям) 5. По сравнению с анемометрами чашечного типа, предложенная установка эффективнее в 1,5 – 2 раза. Из-за увеличенной площади лопастей она имеет больший врачающий момент, который уменьшает порог трогания и обладает большей линейностью характеристики. К недостаткам можно отнести некоторую инерционность ротора.

#### 11.4. Анемометр с доской

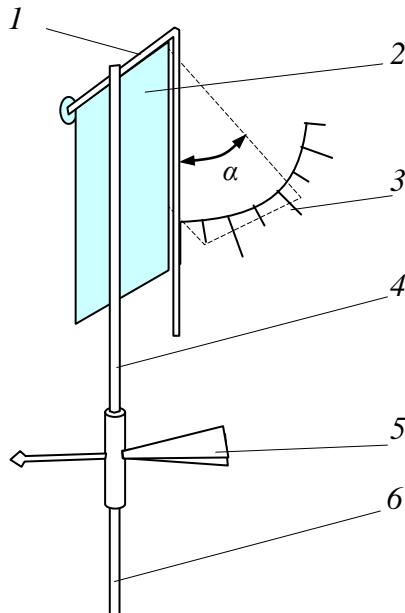
Анемометр с доской (рис. 11.5) представляет собой простейший прибор для измерения мгновенной скорости и определения направления ветра. Он состоит из штока 4, державки 6, вертикально прикрепленной к мачте, и подвижной доски 2.

К штоку 4 жестко прикреплен флюгер 5, ось которого перпендикулярна доске 2. Шток под действием ветра поворачивается в державке 6 и устанавливает подвижную доску перпендикулярно направлению воздушного потока. На штоке имеется металлический сектор с восемью штифтами, по которым определяется скорость воздушного потока в соответствии с углом отклонения подвижной доски. Положение доски можно показать уравнением ее равновесия:

$$\sum M_i = p0.5S - G0.5S \sin\alpha = C_x(0.5S \cos\alpha V)^2 \rho - 0.5GS \sin\alpha,$$

где  $C_x$ - коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho$ - плотность воздуха;  $S$ - площадь доски;  $\alpha$ - угол отклонения доски от вертикального равновесного положения;  $G$ - вес доски;  $V$ - скорость воздушного потока.

В установившемся состоянии  $\sum M_i = 0$ , отсюда имеем:



**Рис. 11.5. Анемометр с доской:** 1- ось; 2- доска металлическая; 3- сектор со штифтами; 4- шток; 5- флюгер (указатель направления воздушного потока); 6- державка

$$C_x(0.5S \cos\alpha V)^2 \rho = 0.5GS \sin\alpha.$$

Измеряемая скорость воздушного потока будет определяться по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{G \sin \alpha}{0.5C_x \rho S(1 - \sin^2 \alpha)}}.$$

### 11.5. Индукционный анемометр

Индукционный анемометр применяется так же, как и анемометр с доской для измерения мгновенных значений скоростей воздушного потока (рис. 11.6). При вращении ротора 1 анемометра вместе с ним вращается жестко закрепленный на оси постоянный магнит 2, находящийся внутри корпуса прибора.

Стрелка 5 анемометра связана с легким алюминиевым диском 3, поворачивающимся за счет наводимых индукционных токов,

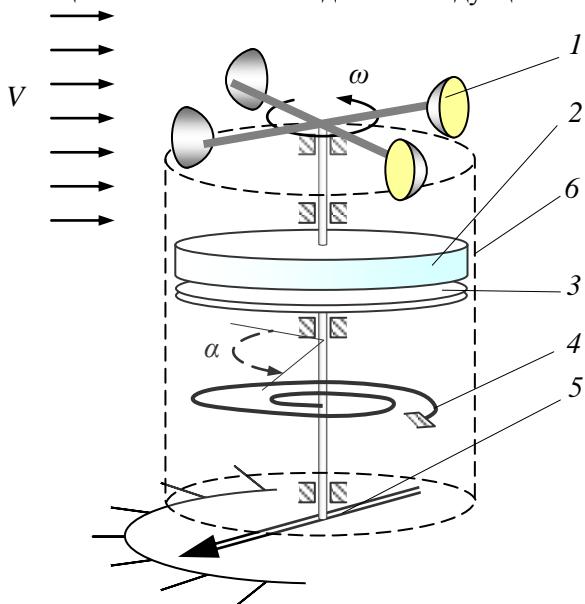


Рис. 11.6. Схема индукционного анемометра: 1- ротор анемометра; 2- вращающийся на одном валу с ротором постоянный магнит; 3- алюминиевый диск; 4- возвратная пружина; 5- стрелка; 6- корпус анемометра

действие которых уравновешивается спиральной пружиной 4.

### 11.6. Пневмометрическая (напорная) трубка

Напорные трубы применяют для измерения скорости и давления в потоках, а также для измерения скоростей в пограничных слоях.

Измерение скорости в потоке среды напорными трубками сводится к измерению динамического давления (скоростного напора), которое равно разности полного и статического давлений и связано со скоростью соотношением, получаемым из уравнения Бернулли:

$$p_n - p_c = \frac{\rho V^2}{2}, \quad (11.1)$$

откуда скорость невозмущенного потока в точке измерения равна:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_n - p_c)}, \quad (11.2)$$

где  $V$  – скорость среды;  $\rho$  – плотность;  $p_n$  – полное давление в лобовой точке напорной трубы, называемой критической;  $p_c$  – статическое давление или гидродинамическое давление в невозмущенном потоке.

Для определения динамического давления необходимо измерить разность полного и статического давлений. Измерение полного давления может быть осуществлено напорной трубкой 3 с отверстием на лобовом её конце (в критической точке), установленной навстречу движению потока, а статическое давление – через наконечник 2 в стенке трубы 1 (рис. 11.7). Так как для определения скорости в данной точке потока надо измерить только разность давлений  $p_n - p_c$ , то обе трубы следует присоединить к микроманометру 4 или жидкостному дифференциальному манометру.

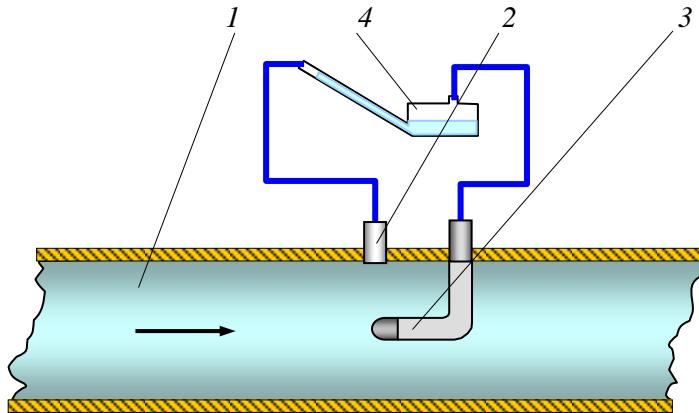
В настоящее время применяют различные конструкции напорных трубок, приспособленных для измерений скоростей потока. Надо иметь в виду, что как бы удачна ни была конструкция трубы, динамическое давление измеряется не вполне точно. Поэтому в правую часть формулы (11.2) вводят поправочный коэффициент.

Этот коэффициент обозначают  $\xi$ . Тогда

$$V = \xi \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_n - p_c)}. \quad (11.3)$$

Коэффициент  $\xi$ , определяемый посредством градуировки, различен для разных конструкций трубок.

Формула (11.2) получена в предположении, что жидкость несжимаема и применима для капельных жидкостей и для газа при небольших скоростях  $M = V/V_{36} < 0,2$ , где  $V_{36}$  – скорость звука.



**Рис. 11.7. Схема измерения скорости потока в трубопроводе напорной трубкой:** 1- трубопровод; 2- наконечник трубы статического давления; 3- наконечник трубы полного давления; 4- микроманометр

Из уравнения Бернулли для энергоизолированного изоэнтропного потока газа, путем интегрирования на участке струи от сечения в невозмущенном потоке до точки полного торможения, легко получается формула скорости потока  $V$ :

$$V = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT \left[ 1 - \left( \frac{p}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (11.4)$$

Здесь,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $k = c_p/c_v$  – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме, показатель адиабаты.

Из формулы (11.4) следует, что для нахождения скорости потока в какой-либо точке необходимо измерить полное и статическое давление ( $p^*$  и  $p$ ), а также температуру торможения  $T$  в этой точке. По этим данным подсчет скорости может быть выполнен по формуле (11.4) или другим методом – по таблице газодинамических функций. В последнем случае рассчитывается отношение давлений:

$$\frac{p}{p^*} = \pi(\lambda),$$

затем по величине  $p(\lambda)$  с помощью таблиц газодинамических функций находится приведенная скорость  $\lambda$ , и далее – скорость потока

$$V = \lambda Q_{kp},$$

где  $Q_{kp}$  – критическая скорость течения газа, определяемая по формуле:

$$Q_{kp} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT}.$$

Критическая скорость течения для воздуха имеет вид:

$$Q_{kp} = 18,3 \sqrt{T} \text{ м/с.}$$

Метод газодинамических функций проще и удобнее по сравнению с непосредственным расчетом скорости по формуле (11.1). Для определения безразмерных скоростей – числа  $M$  или приведенной скорости  $\lambda$  – требуется измерить только полное и статическое давления. Величина  $\lambda$  очень просто находится с помощью таблиц по функции  $\pi(\lambda)$ . В таблицах также обычно даются значения  $M$ , соответствующие данным  $\lambda$ . При отсутствии таблиц число  $M$  и приведенную скорость  $\lambda$  можно вычислить по следующим формулам:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} * \left[ 1 - \left( \frac{p}{p^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]},$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{p^*}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - I \right]},$$

которые для воздуха ( $k=1,4$ ) имеют вид:

$$\lambda = 2,449 \sqrt{I - \left( \frac{p}{p^*} \right)^{0,286}},$$

$$M = 2,236 \sqrt{\left( \frac{p^*}{p} \right)^{0,286} - I}.$$

### 11.7. Дифференциальная трубка Пито (Прандтля)

Широко применяется дифференциальная трубка Пито (в некоторых источниках упомянутая напорная трубка называется трубкой Прандтля) с полусферической головкой наконечника (рис. 11.8). В передней части верхнего цилиндра пневмометрической трубы предусмотрено отверстие 1 для замера полного давления. Это отверстие соединяется внутренней трубкой 2 с наконечником, помеченном знаком «+». На боковой поверхности верхнего цилиндра предусмотрена щель 3 для замера статического давления. Эта щель с помощью полости 4 наружной трубы соединяется с наконечником, помеченным знаком «-». Пневмометрическая трубка вводится в воздуховод так, чтобы ее отверстие 1 было направлено навстречу потоку воздуха. Наконечники с отметками «+» и «-» присоединяют к манометру.

На рис. 11.8, *a* приведена кривая, характеризующая распределение давлений по поверхности наконечника трубы с учетом влияния оказываемого державкой (трубка, перпендикулярная к наконечнику). На оси ординат отложено отношение  $\frac{2(p-p_c)}{\rho V^2}$ . На оси абсцисс отложено отношение  $l/d$ ,  $l$  - расстояние данной точки поверхности наконечника трубы от начала координат,  $d$  - наружный диаметр наконечника трубы. Кривая 1 характеризует распределение давлений вдоль образующей

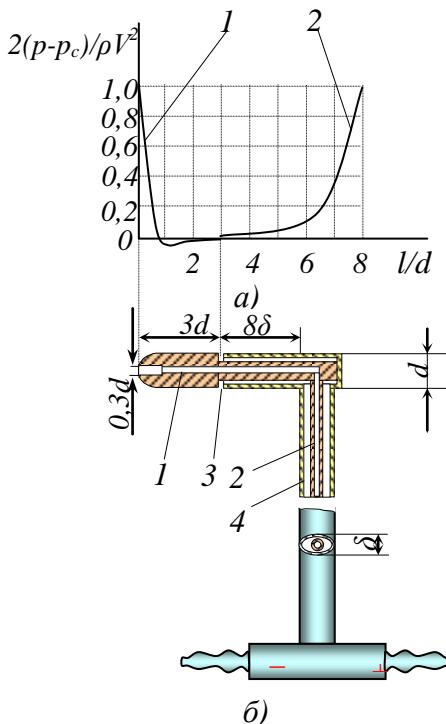


Рис. 11.8. *a*) диаграмма распределения давлений по поверхности наконечника: 1- кривая без учета державки; 2- с учетом державки; *б*) схема трубы Пито: 1- головка с отверстием для измерения полного давления; 2- внутренняя трубка; 3- боковая щель; 4- наружная трубка

наконечника трубы без учета влияния, оказываемого державкой. Кривая 2 характеризует распределение давлений, обусловленных влиянием державки.

В лобовой точке наконечника, называемой критической  $\frac{2(p - p_c)}{\rho V^2} = 1$ , что и обуславливает выполнение отверстия в этой точке для измерения полного давления.

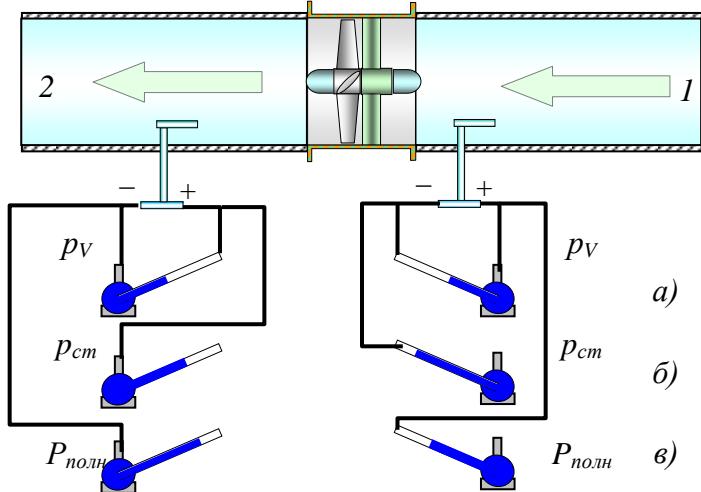
На поверхности наконечника трубы имеется область, отвечающая отношению  $l/d=3$ , для которой с достаточной степенью приближения можно принять  $p - p_c$ . Это является обоснованием к выбору места щели на поверхности наконечника трубы для измерения статического давления. При изготовлении дифференциальной трубы необходимо строго соблюдать форму и размеры, приведенные на рис. 11.8.

Для дифференциальных трубок при  $Re_d = \frac{Vd}{\nu} > 700$  поправочный коэффициент  $\xi$  близок к единице в пределах около 1%. При  $Re_d < 700$  коэффициент  $\xi$  быстро падает и при  $Re_d \approx 300$  отличается от единицы примерно на 6%.

Особенностью пневмометрической трубы является её нечувствительность к малым отклонениям оси наконечника от направления набегающего потока.

Дифференциальную трубку малых размеров достаточно точно изготовить затруднительно, поэтому для измерения скоростей в трубах небольшого диаметра, а также в пограничных слоях применяют трубы Пито с диаметром наконечника 0,5-1 мм. В этом случае статическое давление измеряют через отверстие 2 в стенке воздуховода или трубы (рис. 11.7).

При определении скорости воздушного потока от 5 до 25 м/с измеряемое динамическое давление невелико, например, для потока воздуха, находящегося под давлением, близким к атмосферному, лежит в пределах от 1,6 до 40 кгс/м<sup>2</sup> (16-400 Па). Поэтому для измерения малых скоростей воздушного или газового потока применяют анемометры.



**Рис. 11.9. Схемы присоединения пневтометрической трубы к микроманометру при измерении давлений во всасывающем 1 и нагнетательном 2 воздуховодах.**

На рис. 11.9 приведены схемы присоединения пневтометрической трубы к микроманометру при измерении давлений во всасывающем 1 и нагнетательном 2 воздуховодах. При определении динамического давления присоединение осуществляется по схеме (а), статического давления – по схеме (б) и полного – по схеме (в).

Значение любого давления  $p$ , Па, определяют по формуле

$$p = \rho g (h - h_0) \sin \alpha \cdot 10^3,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , для спирта  $\rho = 800-820 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h$  – отчет (в момент измерения) по шкале, мм;  $h_0$  – начальный (до опыта) отчет по шкале, мм;  $\alpha$  – угол наклона трубы к горизонту, град.

Измерив в данной точке динамическое давление, Па:

$$p_V = \frac{\rho V^2}{2},$$

можно определить и скорость движения воздуха  $V$ , м/с, в этой точке:

$$V = \sqrt{\frac{2(p_n - p_c)}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2(\rho_{жк} g h_2 - \rho_{жк} g h_1)}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2\rho_{жк} g \Delta h}{\rho_a}},$$

где  $p_n$  - полное давление, мм. рт. ст.;  $p_c$  - статическое давление, мм. рт. ст.;  $\rho_{жк}$  - плотность жидкости в манометре, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_a$  - плотность воздуха 1,23÷1,26 кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{жк}$  - плотность жидкости в манометре (для спирта 800...810 кг/м<sup>3</sup>, для воды 1000,0 кг/м<sup>3</sup>);  $\Delta h$  - разность показаний в коленах U- образного преобразователя давления.

## 11.8. Термоанемометр

Степень турбулентности, а также скорости воздушного потока в очень маленьких объемах измеряют термоанемометрами. Принцип работы основан на изменении электрического сопротивления проводящего материала от температуры. Обычно у металлов такая зависимость возрастающая. На рис. 11.10 показаны графики изменений относительного сопротивления –  $R_t/R_0$  металлов и полупроводников в зависимости от температуры –  $t^0$ . Измерение осуществляется по степени охлаждения набегающим потоком воздуха расположенных перпендикулярно к потоку воздушного потока проволочных зондов, нагреваемых электрическим током. В этом случае температура, а значит, и сопротивление зонда  $R_3$

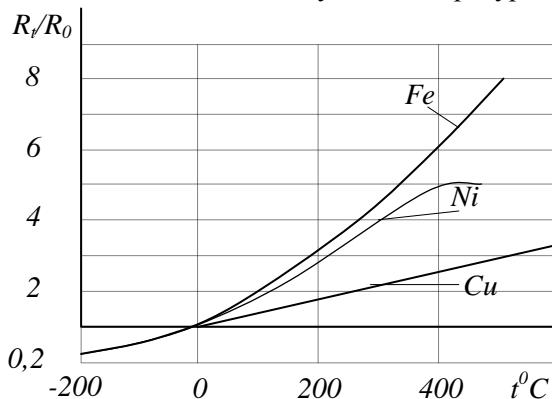
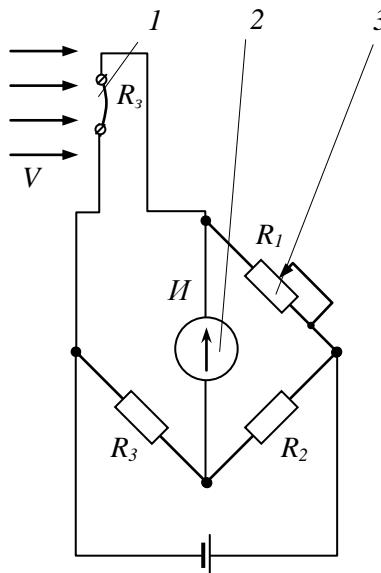


Рис. 11.10. Зависимости относительных сопротивлений металлов от температуры

уменьшается с увеличением скорости  $V$  воздушного потока, или питающее напряжение моста регулируется с помощью сервоусилителя таким образом, что температура зонда остается постоянной. В качестве измеряемого па-

раметра для определения скорости воздуха в первом случае служит разность потенциалов моста, во втором случае - рабочее напряжение моста. Перед применением они градуируются с помощью миниатюрной аэродинамической трубы.

На рис. 11.11 приведена электрическая схема термоанемометра по принципу изменения сопротивления одного из плеч одинарного моста постоянного тока. При изменении сопротивления  $R_3$ , равновесие моста нарушается и стрелка индикатора 2 отклоняется от нулевого положения. Величина отклонения пропорциональна температуре зонда 1. Нулевое значение индикатора устанавливают резистором 3 при отсутствии скорости воздушного потока.



**Рис. 11.11. Электрическая схема термоанемометра: 1- зонд; 2- индикатор; 3- резистор установки нуля**

### Контрольные вопросы

- Назовите, какие приборы относятся к показывающим?
- Какие приборы относятся к приборам, показывающим среднее значение скорости воздушного потока, и почему?
- Каким образом уменьшают влияние температуры окружающей среды на показание скорости воздушного потока в термоанемометрах?
- Что является чувствительным элементом термоанемометра крыльчатого, чашечного и с доской?
- Покажите способы повышения чувствительности трубы Питто.
- Можно ли использовать анемометры в качестве расходомеров воздуха?

## ГЛАВА 12. Преобразователи температуры

### 12.1. Биметаллические преобразователи температуры

В системах контроля, сигнализации, защиты от перегрева, двухпозиционного регулирования температуры широко применяются преобразователи с биметаллическими (термобиметаллическими) слабо выпуклыми сферическими мембранными в качестве чувствительных к изменению температуры элементов.

Действие приборов основано на свойстве диска скачкообразно изменять направление прогиба при достижении заданной температуры. Изменение температуры диска может осуществляться различными способами теплообмена среды с диском, например, конвективным, теплопроводностью, лучеиспусканием, нагревом джоулевым теплом при прохождении электрического тока через диск или пластиинку.

Биметаллом называется устройство, состоящее из двух или нескольких слоев прецизионных сплавов или металлов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения.

Биметалл состоит из активного слоя с большим температурным коэффициентом линейного расширения, пассивного слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения и промежуточного слоя, размещаемого между активным и пассивными слоями.

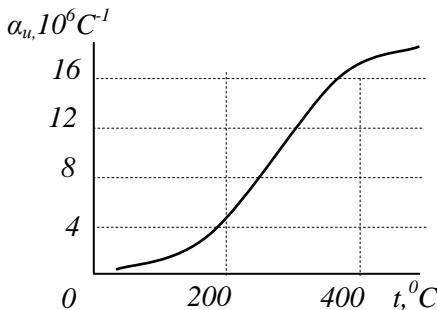


Рис. 12.1. График зависимости коэффициента линейного расширения от температуры

Биметаллы работают в широком интервале температур от минус 80 до плюс 450 градусов  $C^0$ . На рис. 12.1 показан график зависимости коэффициента линейного расширения  $\alpha$  от температуры  $t$ . Большинство современных марок термобиметаллов построены на ос-

нове сплавов железо-никель. В качестве пассивного слоя применяют сплавы, содержащие от 34 до 54% никеля, а в качестве активного – сплавы, содержащие 14 – 25% никеля. Средний слой в целях уменьшения электрического сопротивления и из-за хорошей теплопроводности изготавливают из меди или никеля.

К основным характеристикам термобиметаллов относятся: термочувствительность – чувствительность к изменению температуры, характеризуемая величиной удельного изгиба ( $A, 1/C^0$ ) или коэффициентом чувствительности ( $M10^6, 1/C^0$ ); удельный изгиб свободного конца пластины термобиметалла при нагреве на  $1^0C$ , отнесенный к единице длины и толщины; рекомендуемый интервал температуры, при котором термочувствительность близка к линейной; предельная температура нагрева, температурный коэффициент электросопротивления; удельная теплоемкость. Удельный изгиб вычисляют по формуле:

$$A = \frac{\Delta y \delta \cdot 10^4}{\Delta t \cdot l^2},$$

где  $\Delta y$  – отклонение свободного конца образца от первоначального положения при температуре  $25^0C$ , в миллиметрах;  $l$  – расчетная длина образца, мм;  $\Delta t$  – разность температур биметала.

Коэффициент чувствительности вычисляют по формуле:

$$S = \frac{\varphi \pi \delta}{270 l \Delta t},$$

где  $\varphi$  – угол раскручивания, градус;  $\Delta t = 140^0 - 30^0 C$ .

Прямая пластина (рис. 12.2), жестко закрепленная одним концом, при равномерном нагреве изгибается, образуя дугу окружности с центром со стороны пассивного слоя.

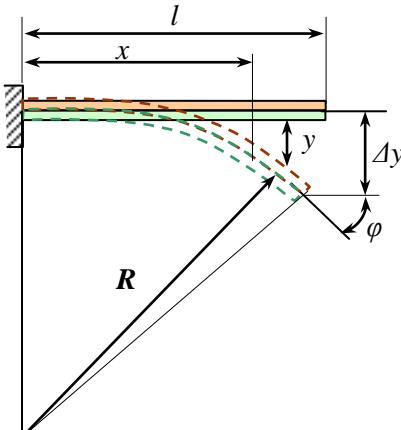


Рис. 12.2. Схема работы биметаллической пластины

Перемещение любой произвольно выбранной точки пластины на расстояние  $x$  от места закрепления при нагреве от  $t_2$  до  $t_1$  определяется из выражения:

$$y = \frac{Ax^2\Delta t}{\delta},$$

при  $x = l$  перемещение свободного конца пластины

$$\Delta y = \frac{Al^2\Delta t}{\delta},$$

где  $A$  – удельный изгиб (изгиб при  $\delta=1$ ,  $l=1$ ,  $\Delta t=1^\circ C$ ) определяемый по формуле:

$$A = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\delta}{2h},$$

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты линейного расширения материала пластины;  $h$  – расстояние между осями симметрии.

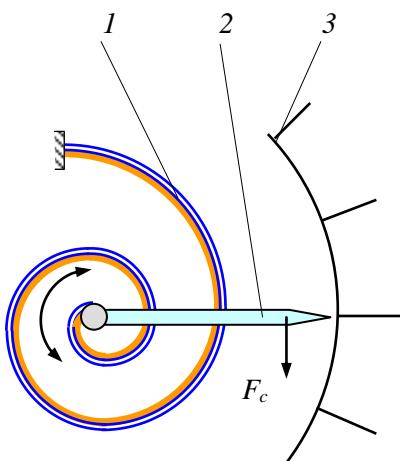


Рис. 12.3. Схема термометра со спиральной биметаллической пружиной: 1- биметаллическая спиральная пружина; 2- стрелка; 3- шкала прибора

Радиус кривизны приблизительно определяют по формуле:

$$R = \frac{\delta}{2A\Delta t}.$$

Угловое перемещение на конце пластины

$$\varphi_0 = \frac{2Al\Delta t}{\delta}.$$

Для получения преобразователей с более чувствительными элементами пластины применяют в виде спиралей и винтовых пружин в измерительных приборах, регуляторах и термо-компенсаторах. На рис. 12.3. приведена схема термометра со спиральной биметаллической пружиной.

Угол отклонения свободного конца для спирали Архимеда, вызванный нагревом на  $\Delta t$  С°, в радианах будет

$$\Delta\varphi = 2A \frac{l\Delta t}{\delta}.$$

Угол отклонения, вызванный внешним моментом,  $M_c$ , когда на свободный конец действует внешняя сила  $F_c$ :

$$\Delta\varphi = \frac{1,2M_c l}{E_0 b \delta^3}.$$

Величина момента, обусловленная нагревом:

$$M_c = \frac{AE_0 b \delta^2 \Delta t}{60}.$$

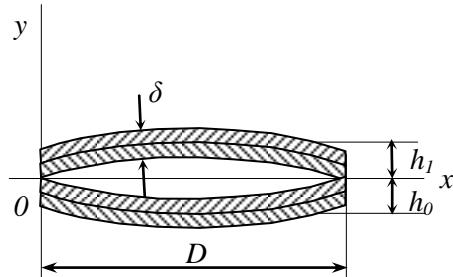
При малых размерах и простоте конструкции термобиметаллические диски занимают особое место в тепловых реле и других устройствах автоматики. Они развивают довольно большие усилия, не требуют закрепления. Перемещение центра сферы диска, вызванное нагревом, приближенно можно определить по формуле

$$h_0 + h_1 = \frac{AD^2 \Delta t}{4\delta}.$$

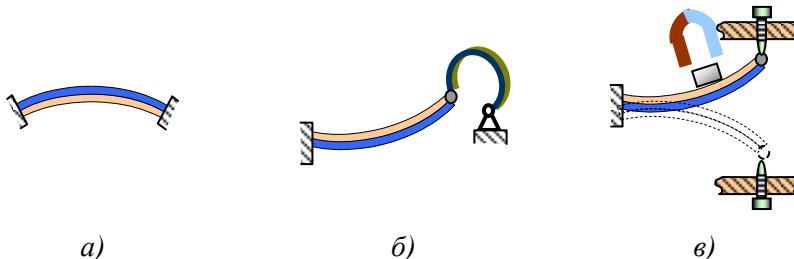
Работа биметаллического дискового преобразователя и величины, входящие в формулу, показаны на рис.12.4.

В коммутируемых дискретных устройствах термобиметаллические преобразователи должны работать в релейном режиме, т.к. замыкание и размыкание контактов должны происходить за очень короткий промежуток времени.

В релейных чувствительных устройствах пластины из термобиме-



**Рис. 12.4. Схема биметаллического дискового преобразователя**



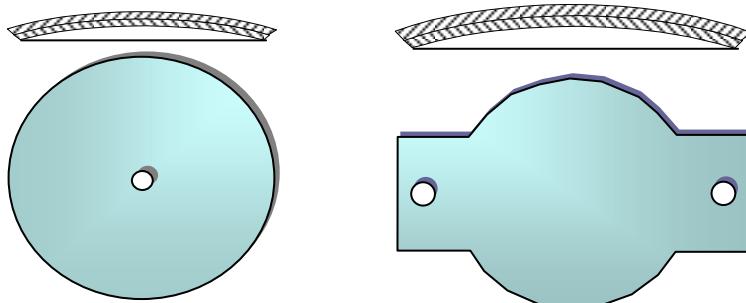
**Рис. 12.5. Схемы креплений биметаллических пластин в релейных преобразователях**

талла бывают или жестко закрепленные с двух концов (рис. 12.5, а) или шарнирно с двух концов или один конец закреплен жестко, а другой – упругим закреплением, например, с помощью пружины или магнита (рис. 12.5, б, в).

Существуют также мембранные, имеющие слабовыпуклую сферу. На рис. 12.6 приведены геометрические формы двух сферических мембран с отверстиями для крепления.

Тепловое воздействие на диск возможно путем теплообмена между диском и окружающей его средой, нагревом диска протекающим через него током, или одновременным действием тока и температуры среды.

Процесс выхлопа диска или пластины с большим радиусом кривизны, чем прогиб центра, приведен на графике (рис. 12.7),



**Рис. 12.6. Геометрические формы двух сферических хлопающих биметаллических мембран**

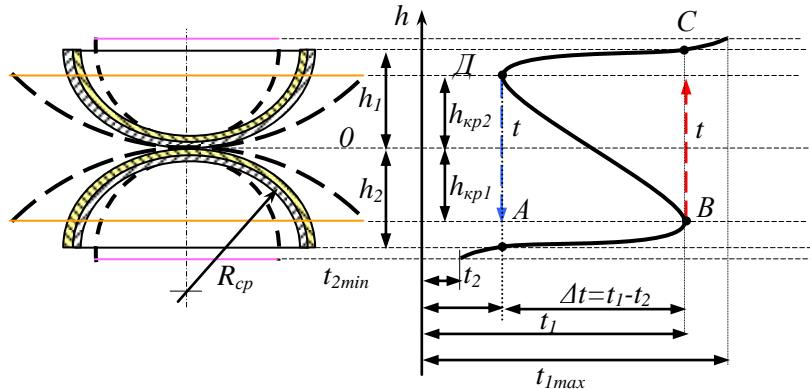


Рис. 12.7. Диаграмма работы хлопающего сферического биметаллического преобразователя

где  $h_0$  – прогиб диска в исходном состоянии. При повышении температуры диск медленно распрямляется, радиус сферы  $R_c$  увеличивается, а прогиб  $h$  уменьшается. Это характеризуется левым участком рабочей характеристики до точки  $B$ . В точке  $B$ , то есть в верхней критической точке, диск мгновенно изменяет

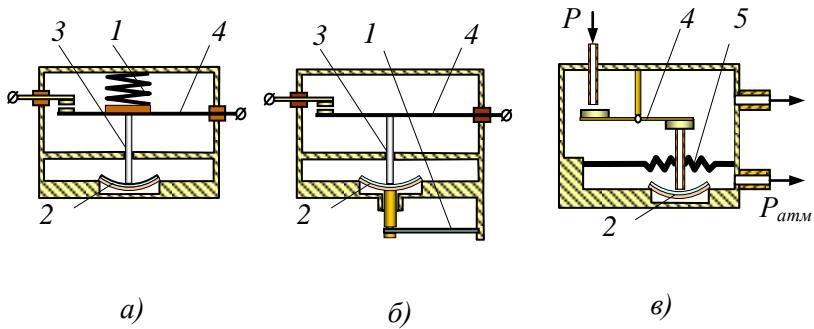


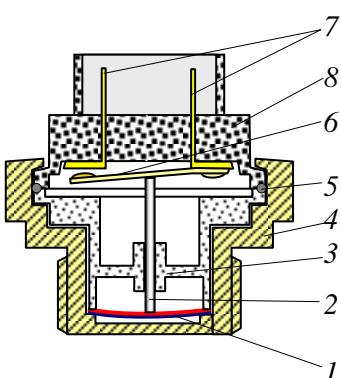
Рис. 12.8. Схемы применений хлопающих биметаллических преобразователей: 1- пружина; 2- биметаллический хлопающий преобразователь; 3- диэлектрический толкатель; 4- контактная пружина с подвижным контактом; 5- мембрана

направление прогиба – выхлопывает при прогибе  $h_{kp1}$ , и новая рабочая точка  $C$  с прогибом  $h_1$  попадает на верхнюю стабильную часть характеристики. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению прогиба. При обратном процессе, то есть при уменьшении температуры, прогиб уменьшается и в точке  $D$ , являющейся нижней критической точкой, равной  $h_{kp2}$ , диск выхлопывает в обратном направлении и занимает точку  $A$ , с прогибом  $h_2$ . Это происходит при температуре  $t_2$ . Зоной нечувствительности по температуре является  $\Delta t = t_1 - t_2$ . Таким образом, диск имеет релейную характеристику, определяемую суммой перемещений  $h_{kp1} + h_{kp2}$ . С целью уменьшения релей-

ной характеристики применяют пружины и другие упругие элементы. На рис. 12.8,  $a, b, c$  приведены некоторые варианты применения упругих элементов.

Для получения чисто релейной характеристики и уменьшения зоны нечувствительности применяют регулируемые упоры, например, на рис. 12.8,  $b$ . Иногда упоры применяют нерегулируемые (рис. 12.8,  $b, c$ ), упругими элементами являются сама биметаллическая пластина и гофрированная мембрана.

На рис. 12.9 представлена конструктивная схема биметаллического контактного преобразователя температуры радиатора автомобиля. При нагреве биметаллический диск (хлопающая мембрана) прогибается в сторону пассивного слоя, т.е. вниз. Так как края касаются неподвижного



**Рис. 12.9. Контактный преобразователь температуры радиатора автомобиля:** 1- биметаллическая хлопающая мембрана; 2- пластмассовый стержень; 3- направляющая ; 4- металлический корпус; 5- резиновый уплотнитель; 6- подвижный контакт; 7- выводы; 8- пластмассовый корпус

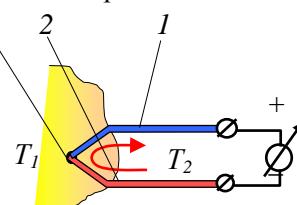
корпуса, то центр мембранны поднимается вверх. Это перемещение центра мембранны толкает пластмассовый стержень 2, а он, в свою очередь, перемещает подвижный контакт 6. При выхлопывании мембранны остается почти в выпуклом неподвижном состоянии, удерживая при этом выводы 7 в замкнутом состоянии. Здесь преобразователь является одновременно и исполнительным устройством, поэтому эта система относится к регуляторам прямого действия.

## 12.2. Термопары

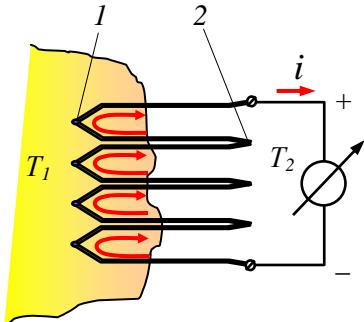
Работа термопары основана на эффекте Зеебека. Суть его заключается в том, что в цепи, составленной из двух разнородных проводников (термоэлектродов), образующих термоэлектрический преобразователь, при разных температурах в местах их соединения (спаях) возникает электродвижущая сила (ЭДС). Величина электродвижущей силы не зависит от длины проводников (термоэлектродов), а только от разности температур спаев (участок контакта двух разнородных проводников). Спай, находящийся в среде с высокой температурой, называется горячим спаем или рабочим концом, а с низкой температурой – свободным концом (рис. 12.10). Для приготовления термопар применяют платину, золото, никель, медь, железо, вольфрам, хромель, алюмель, родий, копель и др.

Термоэлектрод называется положительным, если при соединении его с химически чистой платиной при  $T_1 > T_2$  в нем образуется положительный потенциал по отношению к платине. При использовании сплавов, например, хромель – копель, хромель – алюмель электрод, по которому электрический ток идет от горячего спая, считают положительным.

Зависимость термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) от температуры выражается уравнением:



**Рис. 12.10. Схема термопары: 1- положительный электрод; 2- отрицательный электрод; 3- горячий спай**



**Рис. 12.11. Схема батареи из термопар: 1- горячий спай; 2- холодный спай**

температуры холодного (свободного) конца удаляют от места измерения температуры. Это осуществляется с помощью специальных (компенсационных) проводов. Градуировка термопары, как правило, осуществляется при температуре свободного конца  $T_2 = 0^\circ C$ . При отклонении температуры свободного конца от градуировочной необходимо вводить поправку.

В промышленности применяют десятки типов и разновидностей термопар, различных по своим техническим характеристикам. Например, ТПП- платинородий-платина, ТХА – хромель-алиюмель, ТХК – хромель-копель, ТПР – платинородий-платинородий.

Измеряемая температура от  $-50^\circ C$  до  $1600^\circ C$ , возникающая при этом разность ТЭДС до 66 мВ, диаметры используемых проводов при этом от 0,03 до 3,5 мм.

### 12.3. Пирометр

Для измерения и контроля температуры поверхностей от 100 до  $2500^\circ C$  применяют пирометрические преобразователи по тепловому действию его суммарного и полного излучения. Работа пирометрических преобразователей основана на законе

$E_{1,2}(T_1 T_2) = e_{1,2}(T_1) - e_{1,2}(T_2)$ ,  
где  $E_{1,2}$  – суммарная ТЭДС в мВ;  $e_{1,2}(T_1)$ ,  $e_{1,2}(T_2)$  – потенциалы, возникающие в местах соприкосновения термоэлектродов в мВ.

Для повышения ТЭДС термопары соединяют последовательно, как показано на рис. 12.11.

Для правильного измерения температуры термоэлектрическим методом необходимо обеспечить постоянство

Стефана-Больцмана, согласно которому полная энергия, излучаемая в 1 секунду по всем направлениям с  $1 \text{ м}^2$  черного тела, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$  черного тела и эффекту Зеебека:

$$E_T = \sigma T^4.$$

Основным элементом преобразователя является термобатарея, состоящая из нескольких последовательно соединенных между собой миниатюрных хромель-копелевых термопар. Рабочие спаи имеют вид стрелок и обращены к центру, образуя активный участок, на который проектируется изображение нагретого тела. Для увеличения поглощения лучистой энергии поверхность стрелок термобатареи, обращенная к объекту измерения, зачернена. Свободные концы термопар приварены к тонким медным пластинкам, зажатым между слюдяными кольцами (рис. 12.12). Компенсационное сопротивление из медной изолированной проволоки, шунтирующей термобатарею, наматывают на корпус термобатареи. Из-за повышения температуры корпуса и, следо-

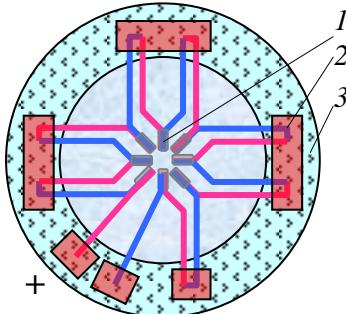


Рис. 12.12. Схема термобатареи пиromетра: 1- горячий спай термопары; 2- холодный спай; 3- слюдяное кольцо

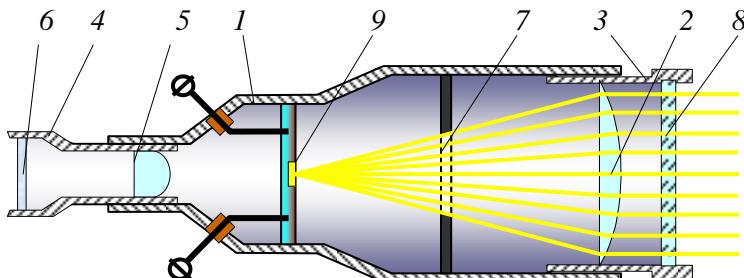


Рис. 12.13. Схема пиromетра: 1- корпус; 2- линза оправы; 3- оправа; 4- окуляр; 5- линза окуляра; 6- цветное защитное стекло; 7- диафрагма; 8- защитное стекло оправы; 9- термобатарея

вательно, холодных концов термобатареи ЭДС при том же потоке излучения уменьшится. Одновременно с этим увеличится сопротивление медного шунта, падение напряжения на нем также увеличится, то есть компенсирует изменения ЭДС, вызванные состоянием холодных спаев.

Телескоп с термобатареей, показанный на рис. 12.13, состоит из корпуса, в которой вмонтированы линза оправы, линза окуляра, защитное стекло, диафрагма, цветное стекло.

В промышленности широко применяют радиационные пиromетры РАПИР с телескопом ТЕРА-50, ППТ и т.д.

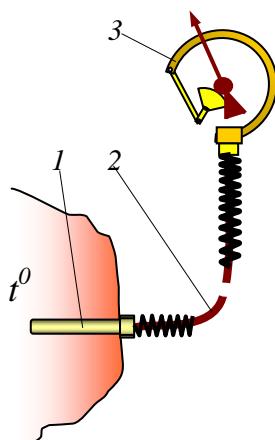
#### 12.4. Манометрические термометры

Бывают газонаполненные, паровые и жидкостные. Газовые термометры заполняют азотом; паровые – низкокипящей жидкостью, под которой находятся ее насыщенные пары; жидкостные – ртутью, ксилолом или метиловым спиртом. В этих термометрах использовано свойство жидкости, газа или пара

изменять свое давление в замкнутом сосуде при нагревании или охлаждении.

Манометрический термометр, представленный на рис. 12.14, состоит из термобаллона, изготовленного из латуни в виде цилиндра диаметром 10-22 мм и длиной 70-435 мм, медной капиллярной трубы длиной до 60 метров в гибкой оболочке и трубчатой пружины, служащей манометрическим устройством.

При нагревании термобаллона давление в системе повышается, трубчатая пружина под действием внутреннего давления изгибается и поворачивается с помощью системы рычагов и тяг стрелки прибора, которая перемещается по шкале на

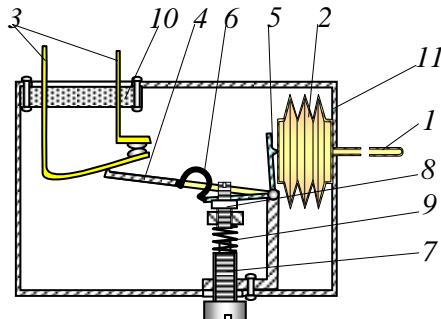


**Рис. 12.14. Схема манометрического преобразователя температуры:**  
1- термобаллон; 2- капиллярная трубка; 3- трубчатая пружина

угол, соответствующий изменению температуры.

В терmostатах, устройствах регулирования температуры, например, в холодильных устройствах нередко применяются преобразователи манометрические с применением в качестве чувствительного элемента сильфонов. Один из таких преобразователей приведен на рис.12.15.

Преобразователь работает следующим образом. Пусть в камере, где помещен преобразователь, температура повышается. Повышение температуры контролируемого объема приводит к увеличению давления внутри чувствительного элемента 1. Увеличение давления внутри сильфона 2, соединенного с капиллярной трубкой, приводит к удлинению первого, а он в свою очередь начинает поворачивать рычаг 5, другой конец которого механически соединен с приводным упругим элементом 6. При этом рычаг 5 поворачивается против хода часовой стрелки, преодолевая усилие возвратной пружины 9. При переходе конца рычага 5, связанного с упругим элементом 6, через мертвую точку рычаг 4 резко поднимается вверх и замыкает контакты 3. Винт 7 предназначен для установки температуры включения охлаждающего устройства, винт 8 применяется для первоначальной настройки преобразователя.



**Рис.12.15. Манометрический преобразователь температуры:** 1- длинный капилляр; 2- сильфон; 3- замыкающие контакты; 4- рычаг; 5- поворотный рычаг; 6- приводной упругий элемент; 7- винт установки температуры; 8- винт настройки; 9- пружина; 10- диэлектрическая пластина; 11- металлический корпус

## 12.5. Терморезисторы

Терморезистор – это преобразователь, содержащий проводник, электрическое сопротивление которого сильно меняется с изменением температуры. Они представляют собой тонкую медную, никелевую или платиновую проволоку, намотанную на слюдяной или керамический каркас, который затем защищается металлическим корпусом. Платиновый терморезистор (рис. 12.16, а), состоит из двух или четырех соединенных последовательно платиновых спиралей 2, к которым припаяны выводы 1. Спирали помещают в каналы керамического каркаса 3. Спирали и выводы в каркасе крепят глазурью.

Сопротивление при  $0^{\circ}\text{C}$  подгоняют постепенным вытягиванием и отрезанием витков спиралей. После этого пространство между спиралью и каркасом засыпают смесью керамического порошка 4 и солей типа баратов щелочных металлов или галогенидов щелочноземельных металлов, предохраняющих платину от загрязнения и воздействия вредных примесей.

Медные терморезисторы (рис. 12.16, б) представляют собой бескаркасную безиндукционную намотку 3 из медной проволоки диаметром 0,08 мм, покрытую фторопластовой пленкой 4. К намотке припаяны два вывода 1. Для обеспечения вибробустойчивости намотку помещают в тонкостенную металлическую гильзу 5, засыпанную керамическим порошком 6 и герметизированную термоцементом.



Рис. 12.16. Схемы терморезисторов: а) платинового: 1-выводы; 2- платиновые спирали; 3- керамический каркас; 4- уплотнитель; б) медного: 1- выводы; 2- корпус; 3- намотка из медной проволоки; 4- пленка фторопластовая; 5- металлическая гильза; 6- керамический порошок

С помощью медных терморезисторов измеряют температуру в диапазоне от  $-50$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ , с помощью платиновых от  $-260$

до  $+1300^{\circ}\text{C}$ . Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  представляет собой относительное изменение сопротивления терморезистора  $\frac{\Delta R}{R}$  на единицу приращения температуры  $\Delta t$

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\Delta t}.$$

Для металлов эта величина положительная.

Зависимость электрического сопротивления платиновых терморезисторов от температуры определяется (для положительных температур) по формуле

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

для отрицательных температур:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3],$$

где  $R_t, R_0$  - сопротивление проволоки при температурах  $t$  и  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $A, B, C$  – коэффициенты. Чувствительность определяется

$$S = \frac{dR_t}{dt} = R_0(A + 2Bt).$$

Зависимость сопротивления медного терморезистора от температуры имеет вид:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t),$$

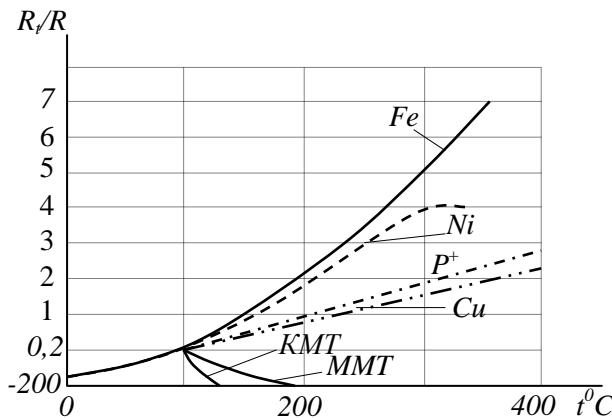
где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления меди.

Чувствительность определяется по формуле:

$$S = \frac{dR_t}{dt} = R_0\alpha.$$

На рис. 12.17. показана зависимость относительного сопротивления различных материалов терморезисторов от температуры.

Погрешности терморезисторов обусловлены нестабильностью питающего напряжения, перегревом терморезистора измерительным током, изменением сопротивления проводов, соединяющих терморезистор с измерительным прибором, тепловой инерцией.



**Рис.12.17. Зависимость относительного сопротивления различных материалов терморезисторов от температуры**

Явление тепловой инерции заключается в том, что при изменении температуры измеряемой среды передача тепла к преобразователю происходит не мгновенно, а с запаздыванием, определяемым постоянной времени нагрева:

$$\tau = \frac{cm}{kS},$$

где  $c$ - теплоемкость, зависящая от материала и геометрических размеров терморезисторов;  $m$ - масса терморезистора;  $S$ - площадь поверхности контакта преобразователя со средой;  $k$ - коэффициент теплоотдачи, зависящий от параметров среды.

Инерционность терморезисторов колеблется в пределах от 4 секунд до 4 минут.

## 12.6. Термисторы

Кроме металлических терморезисторов сопротивления применяют полупроводниковые терморезисторы – термисторы. Термисторы – это преобразователи температуры, изготовленные из полупроводникового материала. Для их изготовления применяют медномарганцевые (ММТ) и кобальтомарганцевые (КМТ) соединения, сплавы и окислы урана, серебра, никеля.

Чувствительность термисторов значительно выше, чем у металлических терморезисторов, причем их сопротивление резко уменьшается с увеличением температуры. Зависимость сопротивления  $R_t$  от температуры  $t$  имеет вид:

$$R_t = R_0 e^{(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0})},$$

где  $B$  – коэффициент, зависящий от физических свойств материала,  $T = 273^0 + t^0 C$  – абсолютная температура.

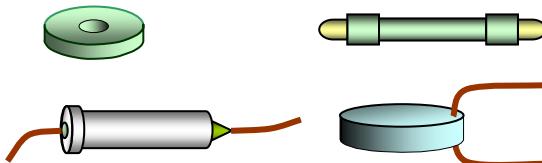
Температурный коэффициент сопротивления термисторов определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{dR}{dt} \frac{1}{R} = -\frac{B}{T^2}.$$

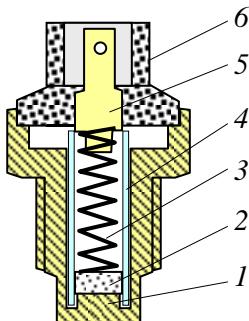
Значение  $\alpha$  для термисторов в 6-10 раз больше, чем для металлических терморезисторов.

Термисторы могут быть выполнены в виде стержня, диска, шайбы, шарика, иглы, пленки и других форм с металлическими выводами. Для защиты от влаги чувствительный элемент покрывают слоем лака или стекла, при необходимости его помещают в герметизированный стеклянный баллон или металлический корпус. К преимуществам относятся: малые размеры, высокая чувствительность. К недостаткам следует отнести: нелинейность, нестабильность и разброс характеристики. На рис. 12.18 приведены некоторые виды термисторов. Их внешние конфигурации зависят от назначения и места установки преобразователей.

На рис. 12.19 приведен преобразователь (датчики) температуры, применяемый для контроля температуры двигателя внутреннего сгорания автомобилей ВАЗ-11113 ОКА.



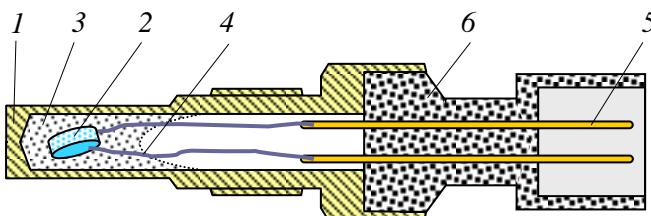
**Рис. 12.18. Внешние формы некоторых термисторов**



**Рис. 12.19. Полупроводниковый преобразователь температуры:**  
1- металлический корпус; 2- полупроводниковый элемент; 3- прижимная пружина; 4- цилиндрическая изолирующая трубка; 5- разъем; 6- диэлектрический корпус

Датчик вворачивается в блок цилиндров автомобиля. Дно металлического корпуса 1 вводится в среду охлаждающей жидкости. При изменении температуры охлаждающей жидкости из-за изменения сопротивления полупроводникового кристалла ток в цепи преобразователя, протекающего по цепи, разъем 5, прижимная пружина 3, полупроводниковый кристалл 2, корпус 1 и масса автомобиля изменяется. Изменение тока в цепи фиксируется индикатором в салоне автомобиля.

На рис. 12.20 изображен преобразователь температуры в системе охлаждения автомобилей семейства ВАЗ-21083-2112. Этот преобразователь отличается от предыдущего тем, что, во-первых: полупроводниковый кристалл изолирован от корпуса преобразователя и теплопередача осуществляется через теплопроводящую пасту; во-вторых: область чувствительного элемента находится дальше от резьбового соединения с блоком цилиндров двигателя, что приводит к уменьшению влияния температуры блока цилиндров; в-третьих:



**Рис. 12.20. Полупроводниковый преобразователь температуры:**  
1- металлический корпус; 2- полупроводниковый чувствительный элемент; 3- теплопроводящая паста; 4- соединительный провод; 5- разъем; 6- диэлектрический проходник

в цепи нет контактных соединений, приводящих к нарушению надежного контакта в цепи. Поэтому преобразователи, приведенные на рис. 12.20, точнее и надежнее в эксплуатации.

## 12.7. Термометры жидкостные

Термометры стеклянные жидкостные (рис. 12.21) применяются для измерения температур в области от  $-200$  до  $+750^{\circ}\text{C}$ . Они получили большое распространение вследствие простоты обращения, достаточно высокой точности измерения и низкой стоимости. Основными элементами жидкостных термометров являются: стеклянный резервуар 1, соединенный со стеклянным капилляром 2, в которых находится жидкость 3 с большим коэффициентом объемного теплового расширения. Для определения степени расширения жидкости устанавливается шкальная пластина 4.

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре. При этом показания жидкостного термометра зависят не только от изменения объема термометрической жидкости, но и от изменения объема стеклянного резервуара, в котором находится эта жидкость. Наблюдаемое изменение объема жидкости преуменьшено на размер, соответственно равный увеличению объема резервуара и капилляра. Для заполнения жидкостных термометров применяют ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан и т.д. Их характеристики приведены в таблице 12.1.

Из жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные. Они обладают рядом преимуществ благодаря существенным достоинствам ртути, которая не смачива-

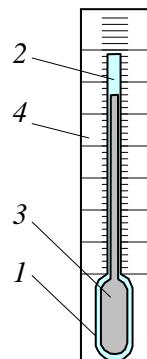


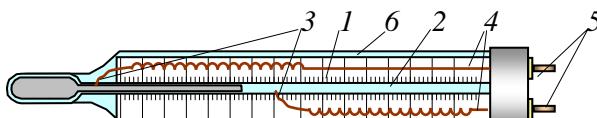
Рис. 12.21. Жидкостный термометр: 1- резервуар; 2- капилляр; 3- жидкость; 4- шкальная пластина

ет стекла, сравнительно легко получается в химически чистом виде и при нормальном атмосферном давлении остается жидкой в широком интервале температур.

**Таблица 12.1.**

Жидкость	Возможные пределы, °C		Коэффициент теплового расширения, K <sup>-1</sup>	
	нижний	верхний	действит.	видимый
Ртуть	-35	750	0,00018	0,00016
Толуол	-90	200	0,00109	0,00107
Этиловый спирт	-80	70	0,00105	0,00103
Керосин	-60	300	0,00095	0,00093
Петролейный эфир	-120	25	0,00152	0,0015
Пентан	-200	20	0,00092	0,0009

У ртутных термометров с пределом измерения выше 200°C пространство над ртутным столбиком в капилляре заполняется сухим газом под давлением. При этом давление газа должно быть тем выше, чем больше верхний предел измерения, что обусловливается необходимостью исключить парообразование ртути в резервуаре при высоких температурах. При измерении температуры до 500°C давление газа достигает свыше 2 МПа (20 кгс/см<sup>2</sup>). В технике, в автоматических устройствах применяют ртутные электроконтактные термометры. На рис. 12.22 показан ртутный электроконтактный термометр со вложенной шкалой 1 и постоянными впаянными в капилляр 2 металлическими контактами 3, к которым припаяны медные провода 4, присоединенные к зажимам 5, смонтированными на корпусе 6 термометра. Количество заданных температур контактирования в интервале температур от -35 до +300°C может быть одно, два или три. Контакты впаиваются в капилляр термометра в местах, соответствующих определенным значениям темпера-



**Рис. 12.22. Схема ртутного электроконтактного термометра: 1- шкальная пластина; 2- капилляр; 3- контакты; 4- медные провода; 5- выводы; 6- корпус**

тур контактирования, которые задаются в зависимости от требований технологического процесса. Минимальные интервалы между двумя соседними контактами обычно выполняются не менее 5, 10, 20 и 30°C, для температур контактирования соответственно до 50, 100, 200 и 300°C.

На рис. 12.23 представлен регулируемый электроконтактный ртутный термометр с магнитной перестановкой контакта. Он имеет две шкалы – верхнюю и нижнюю. Верхняя вспомогательная шкала нанесена на шкальной пластине вдоль овальной стеклянной трубки 1, припаянной к капилляру 2. Указателем этой шкалы при настройке термометра является овальная гайка 3, которая может перемещаться по микровинту 4 вверх и вниз. Верхний конец микровинта жестко соединен со стальным ци

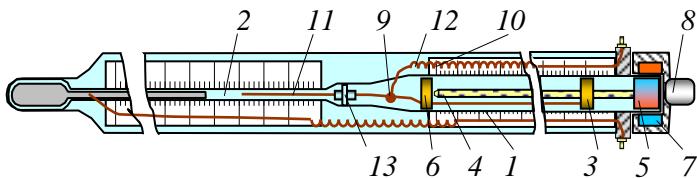


Рис. 12.23. Схема ртутного регулируемого электроконтактного термометра: 1- стеклянная трубка; 2- капилляр; 3- овальная гайка; 4- микровинт; 5- якорь; 6- подпятник; 7- постоянный магнит; 8- колпачок; 9- неподвижный контакт; 10- медный провод; 11- подвижный контакт; 12- медный провод; 13- стеклянная втулка

линдрическим якорем 5, а нижний его конец опирается на подпятник 6. Вращение якоря и микровинта, а вместе с тем и перемещение овальной гайки по последнему, осуществляется с помощью постоянного магнита 7, установленного на колпачке 8, который надет на стеклянную трубку, припаянную к овальной трубке 1.

Термометр имеет один подвижный и один неподвижный контакт. Неподвижный контакт 9, соединенный с медным проводом 10, впаян в капилляр ниже нулевой отметки основной шкалы. Подвижный контакт 11 выполнен из тонкой вольфрамовой проволоки, верхний конец которой закреплен в овальной гайке 3. Этот контакт соединен с медным проводом 12 через

следующие переходы: подвижный контакт – подпятник; подпятник – выводной проводник, впаянnyй в овальную трубку; выводной проводник – медный провод 12. Нижняя часть вольфрамовой проволоки проходит через отверстие в подпятнике, далее соприкасается с выводным проводником, припаянным к подпятнику, и затем проходит через отверстие направляющей стеклянной втулки 13, впаянной в расширенную часть капилляра. Таким образом, нижний конец вольфрамовой проволоки, находящийся в измерительном капилляре, является подвижным контактом термометра. Если овальная гайка будет передвинута по микровинту с помощью магнита на определенную отметку верхней шкалы, то нижний конец вольфрамовой проволоки будет установлен против соответствующей отметки нижней основной шкалы. При нагревании (охлаждении) нижней части термометра до заданной температуры ртуть в капилляре соединит (разомкнет) нижний контакт с подвижным контактом.

Для термометров такого типа применяют универсальные реле, работающие при напряжении 24, 48 и 110 В.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется биметаллом?
2. Назовите основные характеристики биметаллических преобразователей.
3. Каким образом можно повысить чувствительность биметаллических преобразователей?
4. Для каких систем контроля применяются слабовыпуклые биметаллические пластины и мембранны?
5. Приведите примеры применения хлопающих биметаллических преобразователей в системах автоматического регулирования температуры.
6. Почему термопары относятся к генераторным преобразователям?
7. Объясните принцип работы манометрического преобразователя температуры.
8. Назовите преимущества и недостатки терморезисторов и термисторов.
9. Назовите примеры применения термисторов в автомобилестроении.
10. Какие вещества применяются для изготовления жидкостных преобразователей температуры и почему?

## ГЛАВА 13. Влагомеры

Содержание влаги в газе характеризуется абсолютной или относительной влажностью. Под абсолютной влажностью газа подразумевают массу водяного пара, содержащуюся в 1 м<sup>3</sup> газовой смеси. Единицами абсолютной влажности являются кг/м<sup>3</sup> или г/м<sup>3</sup>. Относительной влажностью газа или степенью его насыщения называют отношение массы водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, к максимально возможной массе водяного пара в 1 м<sup>3</sup> той же газовой смеси при тех же условиях (температуре и давлении). Максимально возможным содержанием пара в 1 м<sup>3</sup> газовой смеси является масса 1 м<sup>3</sup> насыщенного пара при данной температуре и соответствующем давлении. Относительная влажность

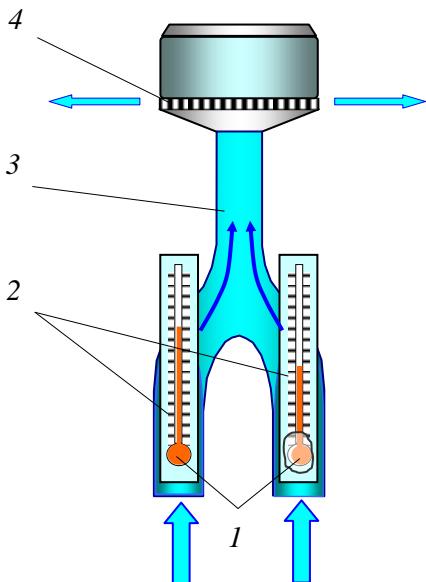
$$\varphi = (\gamma_n / \gamma_u) 100\%.$$

Для автоматического определения влажности в основном применяются методы: психрометрический, точки росы и электрический. Психрометрический метод основан на зависимости скорости испарения влаги в окружающую среду от влажности этой среды. Скорость испарения тем больше, чем суще газ, и наоборот. Методом точки росы определяют температуру, до которой необходимо охладить при постоянном давлении насыщенный водяными парами газ, чтобы довести его до состояния насыщения. Зная температуру точки росы, по таблицам насыщенного водяного пара определяют влажность газа. Электрический метод основан на зависимости электрических параметров гигроскопических материалов от влажности газа.

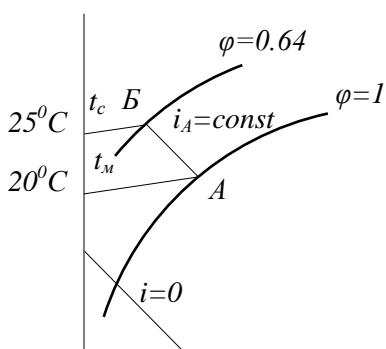
Рассмотрим два устройства измерения влажности газообразной среды – психрометр Ассмана и дистанционный автоматический психрометр.

### **13.1. Психрометр Ассмана**

Для измерения относительной влажности часто применяется психрометр Ассмана (рис.13.1). Ртутные баллоны 1 двух термометров 2 психрометра размещены в полированных и никелированных снаружи металлических трубках 3. Через эти трубы с помощью вентилятора 4, размещенного над ними, просасы-



**Рис.13.1.** Схема психрометра Ассмана: 1- ртутные баллоны; 2- термометры; 3- металлический воздуховод; 4- вентилятор



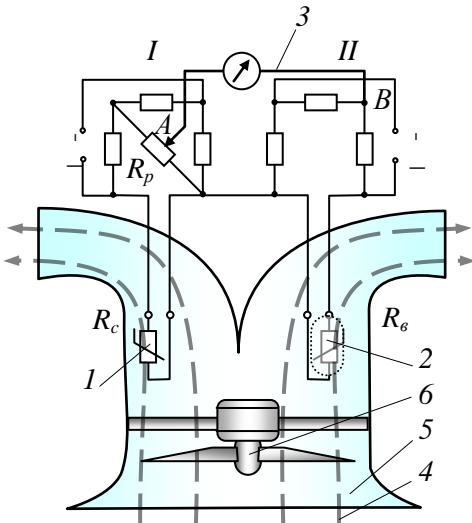
**Рис.13.2.** Диаграмма для определения относительной влажности

вается воздух. Один из термометров сухой, а другой мокрый (баллон его обернут марлей, смоченной водой). Имея показания мокрого и сухого термометров психрометра, по диаграмме (рис.13.2) можно определить относительную влажность воздуха. Допустим, что температура мокрого термометра по психрометру  $t_m=20^0\text{C}$ , а сухого –  $t_c=25^0\text{C}$ . Находим на диаграмме изотерму, соответствующую температуре мокрого термометра, и точку  $A$ , по направлению линии  $i_A=\text{const}$  проводим до пересечения с изотермой сухого термометра  $t_c$  в точке  $B$ . Эта точка лежит на кривой  $\varphi=0,64$ . Следовательно, относительная влажность воздуха равна 64%.

### 13.2. Автоматические влагомеры

Автоматические психрометры работают на основе психрометрического метода. На рис.13.3 приведена схема автоматического психрометра, состоящего из двух платиновых терморезисторов и сдвоенного моста. Один из терморезисторов обернут хлопчатобумажной тканью,

конец которой погружен в ванночку с дистиллированной водой, поступающей из бачка, а другой – сухой. Оба терморезистора обдуваются потоком контролируемого влажного газа со скоростью 3 – 4 м/с. В зависимости от влажности газа терморезисторы будут иметь разную температуру, а следовательно, и сопротивление. Через соединительные провода их подключают к сдвоенному мосту. Сдвоенный мост представляет собой автоматический уравновешенный мост. В плечо I -го моста включен сухой терморезистор  $R_c$ , а в плечо моста II – влажный терморезистор  $R_e$ . Сигнал дисбаланса сдвоенного моста, снимаемый с диагонали  $AB$  (точка  $A$  – контакт движка реохорда  $R_p$ ), пропорционален психрометрической разности температур. При этом относительная влажность газа отсчитывается по шкале прибора.



**Рис.13.3. Схема автоматического психрометра:** 1- платиновый сухой терморезистор; 2- платиновый терморезистор во влажной среде; 3- сдвоенный мост постоянного тока; 4- контролируемый газовый поток; 5- конфузор (воздуховод); 6- электровентилятор

### 13.3. Волосяные гигрометры

В волосяных гигрометрах механически измеряется удлинение обезжиренного человеческого волоса, составляющее в зависимости от относительной влажности воздуха до 2,5%, и переводится в показания влажности. В отличие от гигрометров с искусственными волокнами и пленками гигрометр с человеческим

волосом характеризуется некоторой зависимостью от температуры. Рабочий диапазон волосяных гигрометров составляет от 40 до 90% относительной влажности, а температурная область - от -10 до +50°C. Ошибка измерения может составить более  $\pm 5\%$  относительной влажности. Тем не менее, с помощью волосяного гигрометра можно достичь точности измерения до 1%, если непосредственно перед измерением проводить калибровку гигрометра в специальной испытательной климатической камере.

Скорость установления показаний составляет несколько минут и зависит от измеряемой величины и температуры.

В сухом воздухе из-за предварительного механического натяжения волоса происходит его постепенное удлинение, которое, однако, восстанавливается при помещении гигрометра в воздух высокой влажности.

### **13.4. Биморфные гигрометры**

Основой гигрометра является спиральная пружина, подобная биметаллической пружине (рис.12.3), изготовленная из металлической полосы, покрытой с одной стороны слоем гигроскопического, удлиняющегося от влаги вещества. Среди биморфных гигрометров имеются и такие, которые могут работать длительное время в воздухе со 100%-ной влажностью. Благодаря соответствующему подбору металлических пружин и толщины гигроскопического слоя такие гигрометры имеют малую температурную зависимость и гигроскопический гистерезис, и по точности они приближаются к волосяным гигрометрам.

#### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определения относительной и абсолютной влажности воздуха.
2. Объясните принцип работы психрометра Ассмана.
3. Назовите преимущества и недостатки волосяного и биморфного гигрометра.
4. Что является входной и выходной величиной психрометра Ассмана?

## ГЛАВА 14. Преобразователи состава вещества

### 14.1. Преобразователь (анализатор) растворенного кислорода

Преобразователь растворенного кислорода применяют в системах автоматического контроля за кислородным режимом сточных и природных вод, для регулирования процессов очистки и для контроля .

Конструкция первичного преобразователя растворенного кислорода показана на рис. 14.1.

Преобразователь полярографического анализатора растворенного кислорода выполнен в виде электродной пары, представляющей собой катод 1 из литой платины сферической формы и анод 8 — в виде полого свинцового цилиндра, погруженного в жидкий электролит 7 и закрытого полимерной мембраной 10. Катод 1 навинчивается на корпус 3 из оргстекла, на котором закрепляется также с помощью гайки 2 мембрана 10. Анод 8 крепится на цилиндрическом стержне 9 из оргстекла. Датчик устанавливается в сосуде с помощью шлифа 5 или непосредственно погружается в сточную воду на специальной конструкции. Датчик к электронному усилителю подключается соединительным кабелем 4, токоотводящие провода к которому от катода 1 и анода 8 подводятся в специальных каналах 6.

Молекулярный кислород избирательно диффундирует из

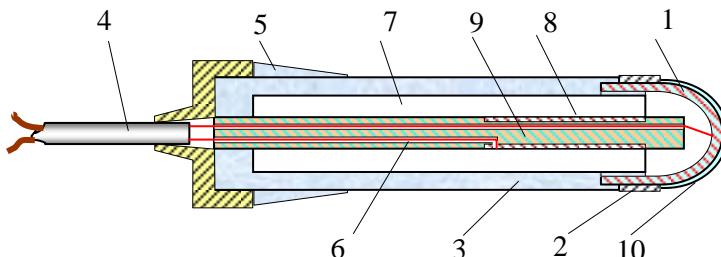


Рис. 14.1. Схема анализатора кислорода: 1- катод; 2- гайка; 3- корпус; 4- соединительный кабель; 5- шлиф (державка); 6- каналы; 7- жидкий электролит; 8- анод; 9- стержень из оргстекла; 10- полимерная мембрана

сточной воды через мембрану 10 к катоду 1, на фоне остальных составляющих воды электровосстановляется в результате электрохимической реакции с образованием гидроокиси свинца. На выходе датчика генерируется выходной токовый сигнал, линейно зависящий от содержания растворенного кислорода в воде.

Анод 8 служит для обеспечения соответствующего потенциала катода 1, достаточного для электровосстановления кислорода, а электролит - для обеспечения электролитической связи между анодом и катодом. Материал полимерной мембранны представляют фторопластовая или полиэтиленовая пленка толщиной, от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $80 \cdot 10^{-6}$  м.

Аналитаторы растворенного кислорода позволяют также существенно повысить производительность труда в аналитических лабораториях при массовых анализах на кислород в отобранных пробах.

#### 14.2. Кислородный преобразователь (лямбда – зонд)

Работа этого преобразователя основана на использовании

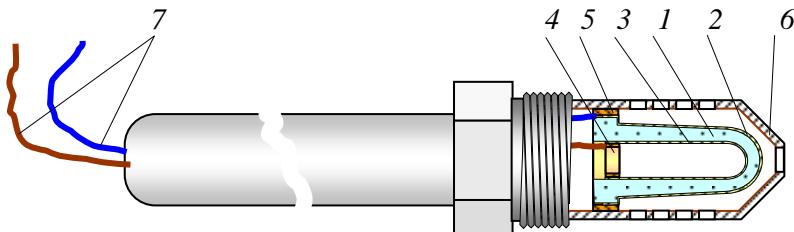


Рис. 14.2. Преобразователь концентрации кислорода: 1-твердый электролит  $ZrO_2$ ; 2- наружный электрод; 3- внутренний электрод; 4- внутреннее контактное кольцо; 5- внешнее контактное кольцо; 6- металлический корпус с отверстиями; 7- выводы

твердого керамического элемента, изготовленного из диоксида циркония и оксида иттрия в качестве гальванического элемента (рис. 14.2).

Напряжение электрического тока создается параллельно электродам из платины и металлокерамики по формуле:

$$U_s = R \frac{T}{4F} \ln \left( \frac{po''_2}{po'_2} \right),$$

где  $R$ - универсальная газовая постоянная;  $F$ - постоянная Фарadays;  $T$ - абсолютная температура;  $po''_2$ - парциальное давление кислорода;  $po'_2$ - парциальное давление отработавших газов. Когда регистрируются высокие концентрации неполностью преобразуемых компонентов отработавших газов, не достигших теплового равновесия, характеристика преобразователя смещается. Это явление должно быть компенсировано изменением ряда конструктивных параметров двигателя. Зависимость характеристик преобразователя от температуры может быть снижена до минимума путем электроподогрева или другим способом.

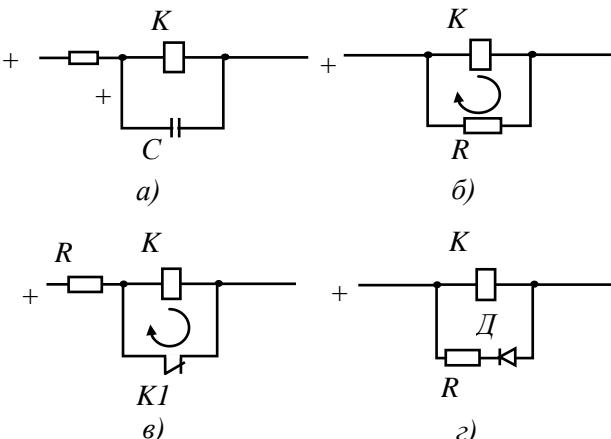
### **Контрольные вопросы**

1. Что является входной величиной анализатора кислорода?
2. На чем основана работа лямда-зонда и что является выходной величиной преобразователя?
3. К какому виду преобразователей относятся преобразователи кислорода и почему?

## ГЛАВА 15. Информационные устройства времени

### 15.1. Электромагнитные реле времени

Реле времени предназначены для включения или отключения объекта в заранее установленное время, а также для счета интервала времени. Реле времени бывают механические с часовым механизмом, пневматические, электромоторные, электромагнитные, конденсаторные и электронные. К наиболее простым относятся электромагнитные реле, которые дают небольшие выдержки времени.



**Рис. 15.1. Схемы замедления изменения тока в катушке реле**

Электромагнитные реле не отличаются стабильностью, но находят достаточно широкое применение благодаря своей простоте и невысокой стоимости. На рис. 15.1 приведены способы замедления изменения тока в катушке реле.

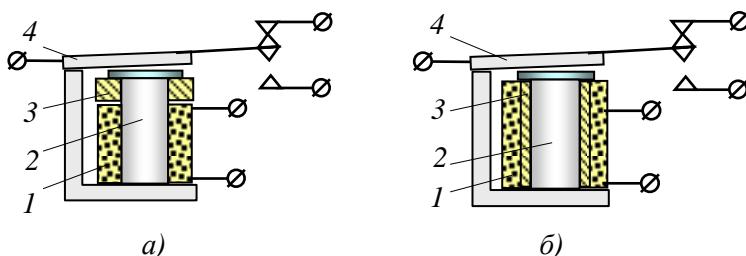
В схеме (a) для замедления срабатывания параллельно катушке реле подключен конденсатор  $C$ . При включении реле конденсатор шунтирует обмотку реле  $K$ , и ток в катушке начинает протекать только после того, как конденсатор зарядится и его сопротивление возрастет. Добавочное сопротивление  $R$  ограничивает начальный ток в цепи.

В схемах (*б*, *в*) после отключения реле уменьшающийся магнитный поток наводит ЭДС в обмотке реле, под действием которой по цепи протекает ток, удерживающий якорь в притянутом состоянии. К недостаткам этих схем можно отнести наличие дополнительных мощностей, возникающих в резисторе  $R$ . В схеме (*г*) в стационарном режиме ток через катушку реле  $K$  протекает, а через балластный резистор  $R$  не протекает, т.к. последовательно включенный диод находится в закрытом состоянии. В момент выключения ЭДС самоиндукции создает ток, который проходит через диод  $D$  и балластный резистор  $R$ , тем самым замедляет убывание тока в обмотке реле, закон убывания которого выражается формулой:

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{R+r}{L}t},$$

где  $i$  – ток в цепи реле;  $L$  – индуктивность катушки реле;  $E$  – ЭДС на зажимах катушки реле;  $R$  – сопротивление балластного резистора;  $r$  – активное сопротивление катушки реле;  $t$  – время. Для получения значительной выдержки времени реле должно быть достаточно массивным, чтобы обеспечить необходимый запас магнитной энергии. Все схемы замедления основаны на использовании энергии, запасенной в магнитном поле катушки для поддержания тока после разрыва цепи питания реле.

Следующий вариант накопления энергии магнитного поля



**Рис. 15.2. Схемы накопления энергии магнитного поля реле постоянного тока: *а*) применением демпфирующей шайбы, *б*) демпфирующего короткозамкнутого цилиндра: 1- обмотка реле; 2- сердечник обмотки; 3- демпфирующая шайба (цилиндр); 4- якорь реле**

реле постоянного тока показан на рис. 15.2, а и б.

Замедление происходит из-за наличия демпфирующей короткозамкнутой обмотки. При отключении обмотки реле от источника питания магнитный поток в сердечнике уменьшается. Это приводит к появлению ЭДС в массивной короткозамкнутой обмотке, обхватывающей сердечник. Малое сопротивление шайбы позволяет получить большой подмагничивающий ток. В результате магнитный поток в сердечнике реле убывает медленно, и якорь остается в притянутом положении до 10 секунд. В некоторых реле вместо короткозамкнутой обмотки (шайбы) применяют медную гильзу, надетую на сердечник (б). Такие реле в схемах управления переменного тока включаются через выпрямитель.

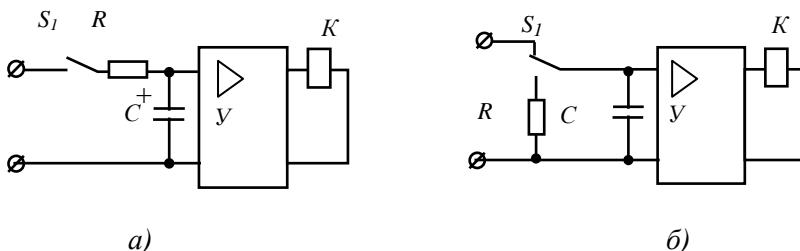
## 15.2. Конденсаторные реле времени

Работа конденсаторных реле времени основана на инерционных свойствах  $RC$  цепи. Принципиальная схема реле показана на рис. 15.3. Схема с зарядом конденсатора (а), работает следующим образом. При замыкании управляющего контакта  $S_l$  по цепи протекает ток, и напряжение на зажимах конденсатора возрастает по закону:

$$u_c = U_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

где  $U_n$  - напряжение питания,  $T = RC$  - постоянная времени цепи.

Это напряжение подается на высокоомный вход полупро-



**Рис. 15.3. Схемы конденсаторных реле: а) замедление при включении, б) замедление при размыкании**

водникового усилителя, включающего пороговый элемент, срабатывающий при заданном напряжении  $U_{cp}$ . Время, через которое срабатывает электромагнитное реле, определяется по формуле:

$$t = T \ln \frac{U_n}{U_n - U_{cp}}.$$

При включении реле времени с разрядом конденсатора (рис. 15.3, б), конденсатор предварительно заряжается до напряжения  $U_n$ ; а при переключении управляющего контакта  $K1$  он начинает разряжаться на резистор  $R$ . Напряжение на конденсаторе уменьшается:

$$u_c = U_n e^{-\frac{t}{T}}$$

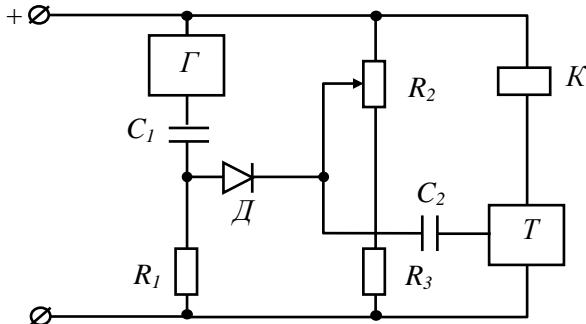
и через время

$$t = T \frac{U_n}{U_{cp}}$$

снизится до величины  $U_{cp}$ , при которой полупроводниковая схема переходит из одного логического состояния в другое. Величину выдержки времени регулируют изменением сопротивления  $R$  или емкости конденсатора  $C$ . Изменением  $C$  обычно регулируют ступенчато, а  $R$  плавно. Конденсаторные реле времени просты, достаточно надежны. Погрешность, около 15%, которая обусловлена разбросами номиналов  $R, C$  и колебаниями напряжения питания  $U_n$ .

Конденсаторное реле времени с импульсным питанием (рис. 15.4) позволяет увеличить выдержку времени в несколько раз. Это достигается питанием конденсатора импульсным напряжением. При этом кратковременные периоды подачи напряжения чередуются с длительными периодами отсутствия напряжения на зажимах конденсатора.

Реле работает следующим образом: конденсатор  $C1$  заряжается импульсами блокинг-генератора  $\Gamma$  с частотой 50-100 Гц. Длительность импульсов 3-5 мкс. Конденсатор  $C1$  включен по мостовой схеме, в диагонали которой имеются пороговый элемент  $V$ , настроенный на заданное напряжение срабатывания,

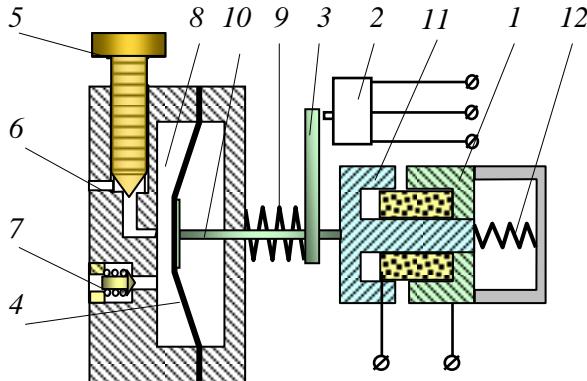


**Рис. 15.4. Схема конденсаторного реле с импульсным зарядом конденсатора**

которое снимается с делителя  $R_2-R_3$ . После заряда конденсатора  $C_1$  пороговый элемент  $V$  открывается и через разделительный конденсатор  $C_2$  выдает управляющий импульс на выходной триггер  $T$ , коммутирующий цепь электромагнитного реле  $K$ . Погрешность этих реле может быть снижена до 1,5%.

### 15.3. Пневматические реле времени

Пневматические реле типа РВП состоят из электромагнитного привода и пневматической приставки, имеющей контакты с временной задержкой (рис. 15.5). Герметическая камера 8 пневмоприставки сообщается с атмосферой через малое дросселируемое отверстие 6. Корпус закрыт эластичной плоской мембраной 4, выполненной из силиконовой резины. Мембрана соединена со штоком 10, который свободно опирается на якорь электромагнита 1. При замыкании управляющего контакта электромагнит 1 втягивает свой якорь 11. Шток 10, лишенной опоры, под действием пружины 9 медленно перемещается за якорем по мере заполнения камеры воздухом через отверстие 6. В конце хода штока рычаг 3 производит переключение контактов микропереключателя 2. Возврат реле в исходное положение происходит при обесточенной обмотке электромагнита под действием пружины 12. При этом воздух из пневматической камеры



**Рис. 15.5. Схема пневматического реле времени:** 1- электромагнит; 2- микропереключатель; 3- рычаг; 4- мембрана; 5- винт; 6- отверстие; 7- обратный клапан; 8- камера; 9- пружина мембранны; 10- шток; 11- якорь электромагнита; 12- пружина якоря

ры мгновенно вытесняется через обратный клапан 7. Выдержку времени реле можно изменять при помощи винта 5 в пределах от 0,4 до 180 с.

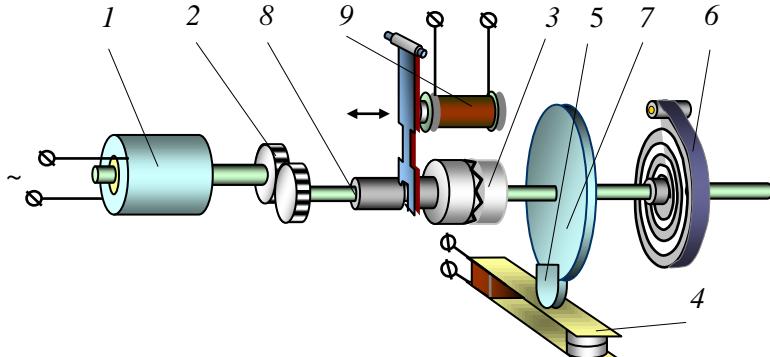
#### 15.4. Моторное реле времени

Для получения больших выдержек времени, исчисляемых десятками минут и часами, используют моторное реле времени. Работа основана на интегрирующих свойствах электродвигателей. Угол поворота вала электродвигателя через угловую скорость определяется

$$d\varphi = \int_{T_1}^{T_2} \omega \cdot dt . \quad (15.1)$$

Интегрируя выражение (15.1), находим интервал времени, в течение которого контакты не срабатывают:

$$\Delta T = \frac{1}{\omega} \Delta \varphi ,$$

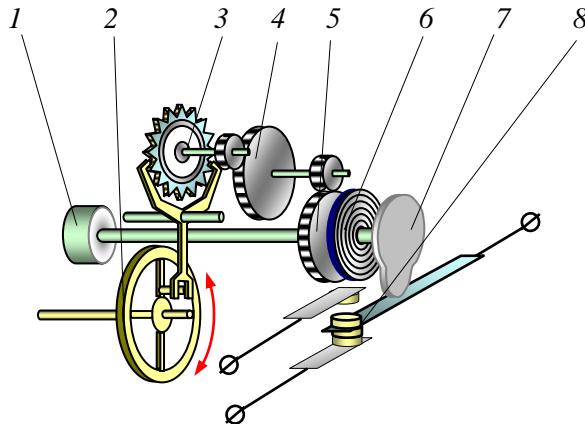


**Рис. 15.6. Схема моторного реле времени:** 1- синхронный электродвигатель; 2- редуктор; 3- муфта; 4- контакты; 5- упор; 6- возвратная пружина; 7- кулачок; 8- вал; 9- электромагнит

где  $\varphi$  – угол поворота вала двигателя;  $\omega$  – угловая скорость;  $\Delta T$  – время поворота на угол  $\Delta\varphi$ . Угол поворота прямо пропорционален установке реле времени. На рис. 15.6 показана схема моторного реле времени. При подаче управляющего сигнала включается электромагнит 9, переключающий муфту сцепления 3. Движение от синхронного электродвигателя 1 через редуктор 2 передается на вал 8, на котором укреплен упор 5, передающий переключение контактной системе 4. Поскольку вал 8 вращается медленно, контактный узел снабжают системой рычагов, обеспечивающей мгновенное переключение контактов. После отсчета задержки времени электромагнит 9 отключается от сети, муфта расцепляется и под действием возвратной пружины 6 кулачок 7 возвращается в исходное положение. Выдержку времени моторного реле регулируют изменением начального положения кулачка или передаточного отношения редуктора.

### 15.5. Реле времени с часовым механизмом

Реле представляет собой часовой механизм, снабженный анкерным ходом, который перемещает упор, воздействующий на контактный узел (рис. 15.7).



**Рис. 15.7. Схема реле времени с часовым механизмом:** 1- заводная ручка; 2- маятник; 3- анкерный механизм; 4- привод анкерно-маятниковой системы; 5- односторонний храповой механизм; 6- заводная пружина; 7- кулачок; 8- контактная система

В кинематической цепи часовом механизма устанавливают шариковую или храповую одностороннюю фрикционную муфту. Это необходимо для возврата упора в исходное положение под действием мощной заводной пружины по истечении установленного времени.

Часовое реле времени сложнее по конструкции, но позволяет получить большие выдержки времени с довольно высокой точностью.

#### Контрольные вопросы

1. Какие из перечисленных преобразователей относятся для измерения интервала времени и какие – текущего времени?
2. Объясните принцип работы электромагнитных преобразователей времени.
3. На каком физическом явлении основана работа конденсаторного реле времени?
4. Покажите преимущества и недостатки электрических преобразователей времени.
5. Составьте электрическую схему моторного реле времени.

## **ГЛАВА 16. Электрические мосты**

В измерительной технике различают одинарные и двойные мосты постоянного и переменного тока, компенсаторы постоянного и переменного тока, автоматические мосты и автоматические компенсаторы. Одним из основных назначений мостов в автоматике – это сравнение контролируемой величины с величиной, заложенной в программу системы автоматического регулирования или управления. Они часто являются промежуточными звенями между преобразователем (датчиком) и усилителем автоматической системы.

### **16.1. Одинарный мост постоянного тока**

Одинарный мост постоянного тока - это четырехполюсник, составленный из четырех резисторов (рис. 16.1). Плечи содержат сопротивления  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . В диагональ АС, называемую выходной, включен нуль-орган (индикатор тока), а в диагональ ВD, называемую диагональю питания, включают источник питания. Сопротивление индикатора обозначим через  $r_u$ . При уравновешивании моста ток в диагонали АС равен нулю при условии:

$$U_{DA} = U_{DC} \text{ и } U_{BA} = U_{BC}$$

или

$$I_1R_1 = I_2R_2 \text{ и } I_3R_3 = I_4R_4.$$

По первому закону Кирхгофа при  $I_u = 0$ ,  $I_4 = I_1$ ,  $I_3 = I_2$ . С учетом этого:

$$I_1R_1 = I_2R_2 \text{ и } I_2R_3 = I_1R_4.$$

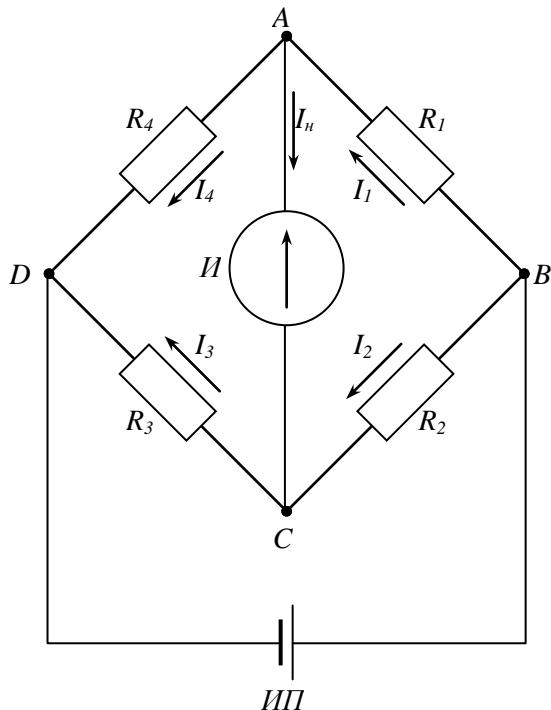
Уравнения равновесия одинарного моста получаются в результате деления обеих частей первого уравнения на части второго с одинаковыми точками

$$\frac{I_1R_1}{I_1R_4} = \frac{I_2R_2}{I_2R_3} \text{ или } R_1R_3 = R_2R_4.$$

Таким образом, на условия равновесия одинарного моста оказывают одинаковое влияние сопротивления каждого из четырех резисторов, а сопротивление индикатора и напряжение источника питания схемы – нет.

Оптимальный режим по чувствительности и потреблению энергии получается при симметрии  $R_1=R_4$  и  $R_2=R_3$ .

Одинарный мост даже при четырехзначном включении резистора  $R_x$  дает большие погрешности вследствие влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов в местах присоединения резистора, измеряемого сопротивление к мосту. Особенно велики погрешности при измерении малых сопротивлений порядка  $10^{-4}...10^{-8}$  Ом. При измерении весьма малых сопротивлений применяют двойные мосты.



**Рис. 16.1. Схема одинарного моста постоянного тока**

## 16.2. Двойной мост постоянного тока

Разновидность мостов, составленная из резисторов, включенных по схеме, показанной на рис. 16.2, называется двойным мостом постоянного тока.

При равновесии индикатора  $I=0$ , по второму закону Кирхгофа для двух контуров запишем уравнения:

$$I_1 R_2 - I_2 R_4 - I_3 R_0 = 0$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_3 - I_3 R_x = 0.$$

Считаем  $R_1=R_3$ ,  $R_2=R_4$ . Тогда имеем:

$$I_1 R_2 - I_2 R_2 - I_3 R_0 = 0$$

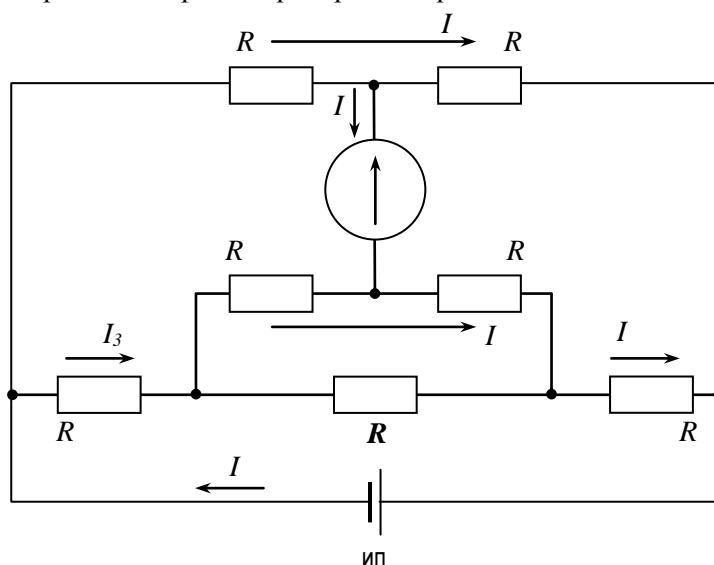
$$I_1 R_1 - I_2 R_1 - I_3 R_x = 0$$

Решая относительно  $R_x$ , получим измеряемое значение сопротивления

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} = R_0 \frac{R_3}{R_4}, \quad (16.1)$$

где  $R_x$  - сопротивление искомого резистора;  $R_0$  – образцовое сопротивление.

Из формулы (16.1) видно, что для измерения сопротивлений достаточно определить отношение, а не абсолютные значения сопротивлений резисторов  $\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_4}$ . При этом сопротивление образцового резистора при измерениях остается неизмен-



**Рис. 16.2. Схема двойного моста постоянного тока**

ным.

Элемент, имеющий сопротивление  $R$ , изготавливают в виде короткого отрезка медного провода большого сечения.

Двойные мосты постоянного тока применяют в основном для измерения сопротивлений от  $1 \cdot 10^{-6}$  до 1 Ом.

### 16.3. Мост переменного тока

Мост переменного тока представляет собой четырехполюсник, составленный из комплексных сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  (рис. 16.3). Равновесие моста обеспечивается при условии:

$$I_1Z_1=I_2Z_2 \text{ и } I_3Z_3=I_4Z_4.$$

По первому закону Кирхгофа  $I_4=I_1$  и  $I_3=I_2$ .

С учетом этого

$$I_1Z_1=I_2Z_2 \text{ и } I_2Z_3=I_1Z_4.$$

Условия равновесного моста получаются в результате деления обеих частей первого равенства на части второго с одинаковыми токами:

$$\frac{I_1Z_1}{I_1Z_4}=\frac{I_2Z_2}{I_2Z_3} \text{ или } \frac{Z_1}{Z_4}=\frac{Z_2}{Z_3},$$

отсюда получим:

$$Z_1Z_3=Z_2Z_4.$$

Для обеспечения равновесия моста переменного тока необходимо, чтобы произведения сопротивлений противолежащих ветвей были равны между собой.

Представим реактивные сопротивления  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  в показательной форме:

$$Z_1=z_1e^{j\varphi_1}, Z_2=z_2e^{j\varphi_2}, Z_3=z_3e^{j\varphi_3}, Z_4=z_4e^{j\varphi_4}.$$

Тогда условие равновесия моста будет иметь вид:

$$\frac{z_1e^{j\varphi_1}}{z_4e^{j\varphi_4}}=\frac{z_2e^{j\varphi_2}}{z_3e^{j\varphi_3}} \text{ или } \frac{z_1}{z_4}e^{j(\varphi_1-\varphi_4)}=\frac{z_2}{z_3}e^{j(\varphi_2-\varphi_3)}.$$

Отсюда

$$\frac{z_1}{z_4}=\frac{z_2}{z_3}, \varphi_1-\varphi_4=\varphi_2-\varphi_3$$

или

$$z_1 z_3 = z_2 z_4, \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

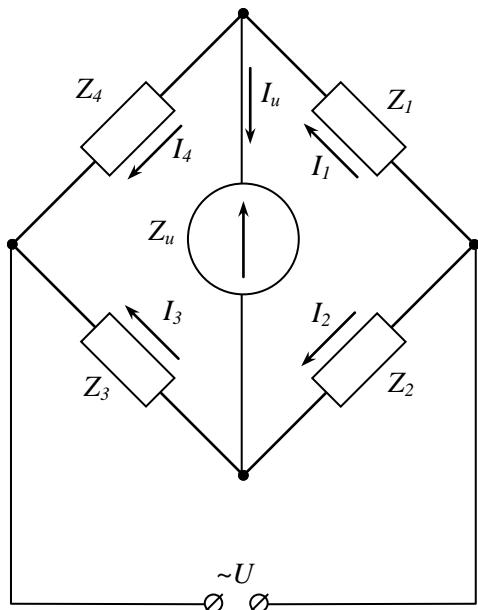
Последнее выражение показывает, что для равновесия моста переменного тока необходимо обеспечить равенство произведений модулей сопротивлений и сумм фазовых сдвигов в ветвях. Поэтому мост переменного тока уравновешивается по переменной регулировкой двух параметров. Для упрощения процесса уравновешивания мостов переменного тока в качестве регулирующих элементов схем включают активные сопротивления, а не реактивные, как переменные конденсаторы или индуктивности.

На практике большое распространение получили мосты переменного тока, у которых в две ветви включены резисторы, а в две другие – реактивные сопротивления (емкостные или индуктивные). Предложенные схемы позволяют значительно

упростить процесс уравновешивания и контролировать не только сопротивления постоянному току, но и параметры комплексных сопротивлений.

Для питания мостов переменного тока применяют специальные генераторы переменного тока стационарной высокой частоты.

При помощи мостов переменного тока контролируют частоту переменного тока, индуктивность и емкость элементов электрических цепей,



**Рис. 16.3. Схема моста переменного тока**

а также неэлектрические величины с применением соответствующих преобразователей.

#### 16.4. Автоматические мосты

Автоматический мост представляет собой мост с изменяющимися сопротивлениями плеч, в измерительную диагональ которого включен фазочувствительный усилитель (например, операционный усилитель), управляющий реверсивным двигателем. Вал двигателя механически связан с ползуном переменного резистора плеч.

На рис. 16.4 показана обобщенная схема автоматического электронного моста.

В исходном состоянии мост находится в равновесии, сигнал на входе усилителя отсутствует. При изменении одного из сопротивлений, например  $R_1$ , связанного с объектом управления, равновесие моста нарушается, и на входе усилителя появляется сигнал в виде напряжения, пропорционального изменению сопротивления  $R_1$ . После усиления напряжение поступает на управляющую обмотку реверсивного двигателя. Под действием этого напряжения вал двигателя, механически связанный с ползуном резистора  $R_1$ , поворачивается до тех пор, пока за счет перемещения подвижного контакта резистора  $R_1$  мост не уравновесится и не прекратится вращение ротора двигателя.

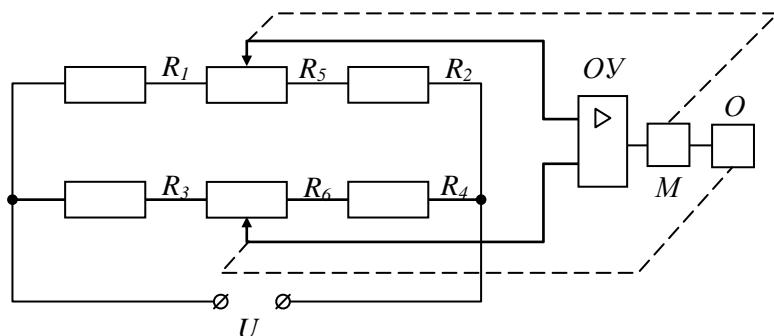
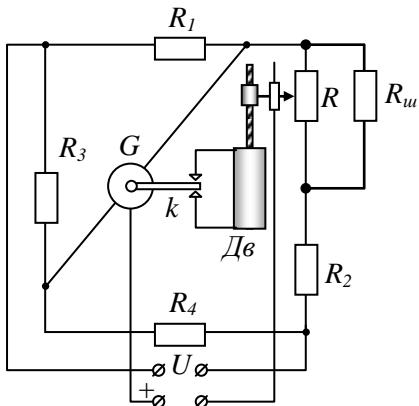


Рис. 16.4. Обобщенная схема электронного автоматического моста



**Рис. 16.5. Схема с автоматическим уравновешиванием моста гальванометром**

На рис. 16.5 приведена мостовая схема с автоматическим уравновешиванием моста. Ползун в положение, необходимое для установления равновесия, перемещается электродвигателем, управляемым контактным гальванометром  $G$ .

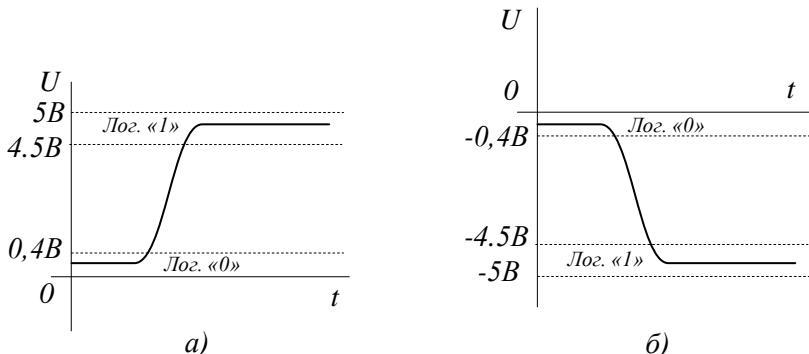
### Контрольные вопросы

1. Какую роль играют электрические мосты в измерительной технике и автоматике?
2. Покажите условия равновесия одинарных мостов постоянного и переменного токов.
3. В чем отличие моста переменного тока от моста постоянного тока?
4. Для каких целей применяют двойные мосты?
5. Составьте электрическую схему дифференциального термоанемометра.
6. Составьте электрическую схему дифференциального преобразователя емкостного уровнемера, температурного преобразователя на полупроводниковых терморезисторах.
7. Нарисуйте электрическую схему электронного автоматического моста и объясните принцип его работы.

## ГЛАВА 17. Алгебра логики

### 17.1. Аксиомы, законы, тождества и теоремы алгебры логики

Для построения систем обработки и преобразования информации, поступившей от преобразователей, электрических мостов и блоков управлений широко применяют цифровые методы. Используемые при этом сигналы близки по форме к прямоугольным и имеют два фиксированных уровня напряжения. Уровню низкого напряжения обычно приписывается символ (состояния) «0», а уровню высокого напряжения – символ (состояния) «1». Важно,



**Рис. 17.1. Принцип реализации сигналов: а) позитивная система; б) негативная система**

чтобы сигнал, соответствующий «1», превышал определенный уровень в пределах 4,5–5 В, а сигнал состояния «0» не превосходил 0,4 В. Такую систему сигналов называют позитивной, т.к. сигнал имеет положительное значение относительно нулевого потенциала. Существует и другая система – негативная, в которой сигнал имеет отрицательный потенциал относительно нулевого. На рис. 17.1 приведены виды позитивного и негативного сигналов.

Математическим аппаратом анализа и синтеза цифровых систем служит алгебра логики (булева алгебра), которая изучает связь между переменными (сигналами), принимающими только

два («0» и «1») значения. Символы «0» и «1» в алгебре логики характеризуют состояния переменных или состояния их функций, в связи с чем эти символы нельзя рассматривать как арифметические числа.

Алгебра логики является алгеброй состояний, а не алгеброй чисел, и для нее характерны основные действия, отличные от принятых в обычной алгебре действий над числами.

В алгебре логики каждой двоичной переменной, например,  $\bar{x}$ , ставится в соответствие обратная или дополнительная к ней (инверсная) переменная, такая, что: если  $x=0$ , то  $\bar{x}=1$ , если  $x=1$ , то  $\bar{x}=0$ .

Переменную  $\bar{x}$  следует читать как НЕ  $x$ .

В алгебре логики в случае одной переменной  $x$  пользуются следующим правилом аксиомы (таблица 17.1):

Правила 1-4 представляют операцию логического сложения

Таблица 17.1

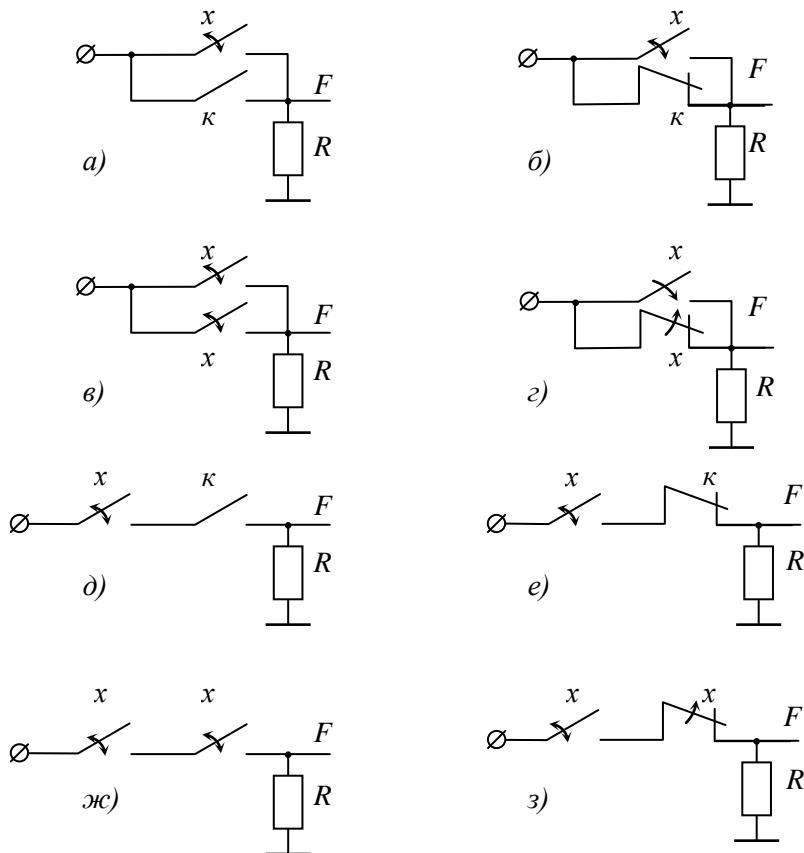
1) $x+0=x$	6) $x \odot 0=0$
2) $x+1=1$	7) $x \odot 1=x$
3) $x+x=x$	8) $x \odot x=x$
4) $x+\bar{x}=1$	9) $x\bar{x} \odot=0$
5) $(\bar{x})=\bar{x}$	10) $(\bar{\bar{x}})=x$

(дизъюнкция), правила 6-9 — операцию логического умножения (конъюнкция) и правила 5, 10 — операцию инверсии. Знак логического сложения «+» читается ИЛИ. Знак логического умножения «·» читается И.

Правила 1-4, 6-9 поясняются схемами (рис. 16.2, а – з) на двух ключах в соответствии с числом слагаемых (сомножителей) в соотношениях. Положению «Ключ включен» соответствует состояние «1», а положению «Ключ выключен» – состояние «0». Для логического сложения (правила 1-4) – ключи в схемах, соединенные параллельно.

Уровень высокого напряжения на выходе ( $F=1$ ) будет иметь место, если хотя бы один ключ находится в состоянии «1» (правила 2, 4; рис. 17.2, б, г).

Результат суммы в правилах 1, 3 зависит от значения  $x$  (при  $x=1 F=1$ , при  $x=0 F=0$ ; рис. 16.2, а, в). Для логического умножения ключи соединены последовательно (рис. 17.2, д-з). Уровень высокого напряжения на выходе ( $F=1$ ) будет только в том случае, если оба сомножителя равны единице, т.е. оба ключа включены. В противном случае результат умножения равен нулю (правила 6, 9; рис. 17.2, д, з). Результат умножения в правилах 7, 8 зависит от значения  $x$  (рис. 17.2, е, жс).



**Рис. 17.2. Схемы, иллюстрирующие операции логического сложения (а – г) и логического умножения (д – з)**

Для алгебры логики, как и для обычной алгебры, действительны следующие законы.

Переместительный закон (закон коммутативности) для логического сложения и умножения:

$$1) x+y=y+x;$$

$$2) x \circ y = y \circ x.$$

Сочетательный закон (закон ассоциативности) для логического сложения и умножения:

$$1) x+y+z=(x+y)+z=x+(y+z);$$

$$2) xyz=(xy)z=x(yz).$$

Распределительный закон (закон дистрибутивности логического умножения по отношению к сложению):

$$x(y+z)=xy+xz. \quad (17.1)$$

Для многих случаев алгебраических преобразований полезными являются тождества, относящиеся к двум и трем переменным (табл. 17.2.):

Таблица 17.2

1) $xy+x\bar{y}=x$	4) $x(\bar{x}+y)=xy$
2) $x=xy=x$	5) $(x+y)(x+z)=x+yz$
3) $x(x+y)=x$	6) $x\bar{y}+y=x+y$

В справедливости тождеств 1 и 2 нетрудно убедиться, вынося за скобку в левой части переменную  $x$ . Тождество 3 доказывается с помощью распределенного закона

$$x(x+y)=xx+xy=x+xy=x.$$

Аналогично доказывается и тождество 4. Для доказательства тождества 5 раскроем скобки в левой части:

$$(x+y)(x+z)=x+xz+xy+yz=x+xy+yz=x+yz. \quad (17.2)$$

К основным законам алгебры логики относятся законы инверсии для логического сложения и умножения (теоремы де Моргана):

$$\overline{x+y+z}=\bar{x}+\bar{y}+\bar{z}, \quad (17.2a)$$

т.е. инверсия суммы переменных есть произведение их инверсий

$$x \cdot y \cdot z = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z}; \quad (17.3)$$

инверсия произведения переменных есть их инверсия.

Справедливость соотношений (17.2) и (17.2a) для двух переменных подтверждает табл. 17.3.

Таблица 17.3

$x$	$y$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$x+y$	$xy$	$\overline{x+y}$	$\bar{x} \cdot \bar{y}$	$\overline{xy}$	$\bar{x} + \bar{y}$
0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	0	1	1	0	0	0	0

В общем случае теоремы де Моргана могут быть представлены в виде, предложенном Шенноном:

$$\overline{F(x, y, z, \dots, +, .)} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots, ; +). \quad (17.4)$$

Теорема в таком виде утверждает, что инверсия любой функции получается заменой каждой переменной ее инверсией и одновременно взаимной заменой символов сложения и умножения. При практическом применении теоремы необходимо строго соблюдать группировки членов, выраженных как явными, так и неявными скобками. В качестве примера определим инверсию функции  $F=x\bar{y} + \bar{x}y$ . По правилу (17.4) находим

$$\overline{F} = \overline{x\bar{y} + \bar{x}y} = (\bar{x} + y)(x + \bar{y}). \quad (17.5)$$

Понятие инверсии и инверсного преобразования играют важную роль при синтезе схем. Использование инверсии на определенном этапе синтеза приводит иногда к существенному упрощению функции, а следовательно, и средств ее реализации.

## 17.2. Минимизация функции

Минимизация (упрощение формы записи) функции является важной операцией при синтезе логической схемы, так как благодаря предварительно проведенной минимизации схема реализуется с наименьшим числом элементов.

Выявить и устраниТЬ избыточность в записи функции можно путем ее преобразований с использованием аксиом, законов, тождеств, теорем алгебры логики. Однако такие преобразования

требуют громоздких выкладок и связаны с большой затратой времени.

На рис. 17.3 приведена карта Карно для двух (*a*) и четырех (*b*) переменных.

Современная алгебра логики располагает рядом приемов, разработанных на основе ее правил, позволяющих производить минимизацию функции более просто, быстро и безошибочно. Для минимизации функции с числом переменных до пяти-шести наиболее удобным является метод карты Карно.

Карта Карно (рис. 17.3, *a*, *b*) представляет собой графическое изображение значений всех возможных комбинаций переменных. Иными словами, карту Карно можно рассматривать как графическое представление всех минтермов заданного числа переменных.

Каждый минтерм изображается на карте в виде клетки. Карта образуется путем такого расположения клеток, при котором минтермы соседних клеток отличаются только значением одной переменной. В связи с указанным, соседними считаются также крайние клетки каждого столбца или строки. Символ «1» характеризует прямое значение переменной, а «0» — ее инверсное значение.

Минтермы минимизируемой функции отмечают единицами в соответствующих клетках карты. Минтермы, не входящие в

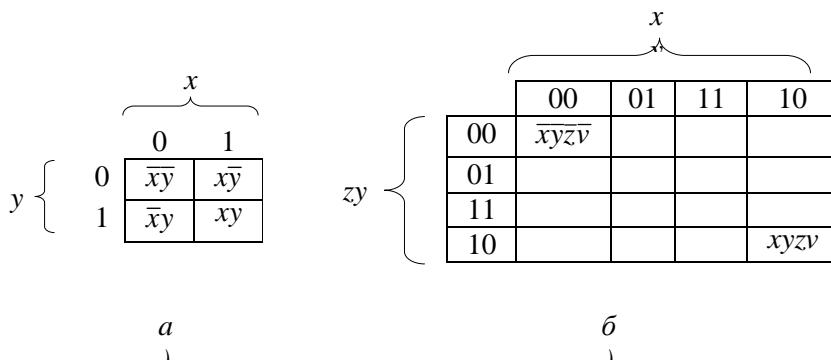


Рис. 17.3. Кarta Карно функции для двух (*a*) и четырех (*b*) переменных

функцию, отмечают в клетках нулями или оставляют клетки пустыми. На основании распределительного закона (1.1), а также аксиом 1 и 4 в (табл. 17.1) два минтерма, находящиеся в соседних клетках, могут быть заменены одним логическим произведением, содержащим на одну переменную меньше. Если соседними являются две пары минтермов, то такая группа из четырех минтермов может быть заменена произведением, содержащим уже на две переменные меньше, и т. д. В общем случае наличие единиц в  $2^n$  соседних клетках позволяет исключить  $n$  переменных. В этом и заключается метод минимизации с применением карт Карно.

Рассмотрим процесс минимизации на примере четырех переменных  $x, y, z, v$  функции, заданной следующим логическим выражением:

$$F = \bar{y}zv + \bar{x}yv + \bar{y}zv + \bar{x}yz + x\bar{z}v + \bar{y}zv + \bar{y}zv + \bar{y}zv.$$

С помощью простейших преобразований представим эту функцию в виде

6 После исключения повторяющихся членов функция выражается в СДНФ (совершенная дизъюнктивная, нормальная форма):

$$F = xyzv + \bar{x}yzv + \bar{x}y\bar{z}v + x\bar{y}zv + \bar{x}\bar{y}zv + \bar{x}\bar{y}\bar{z}v + xy\bar{z}v + x\bar{y}\bar{z}v + \bar{x}\bar{y}\bar{z}v + x\bar{y}\bar{z}v + \bar{x}\bar{y}\bar{z}v$$

Функция состоит из 11 минтермов, в связи с чем на карте Карно (рис. 17.4) ее будут представлять 11 клеток, отмеченных единицами. Так, например, первый минтерм функции  $xy\bar{z}v$  будет отображаться клеткой, имеющей координаты  $xy$  и  $zv$ , соответственно 11 и 11. Пять клеток карты остаются свободными. Затем на карте Карно необходимо определить соседние минтермы (клетки) и объединить их в минимальное количество групп соседних минтермов (клеток). Для наглядности выделенные группы соседних клеток показывают сплошными линиями. Минимальное количество групп соседних минтермов для рассматриваемой

Рис. 17.4. Карта Карно функции

мой функции будет равно трем.

В первую группу входят две нижние клетки второго столбца слева с минтермами  $xuzv$  и  $xuzv$ . В соответствии с аксиомой 4 в таблице 17.1 имеем

$$\bar{x}uzv + \bar{x}uz\bar{v} = \bar{x}uz(v - \bar{v}) = \bar{x}uz,$$

т.е. переменная  $u$  из этой группы может быть исключена.

Вторая группа состоит из двух пар верхних клеток крайних столбцов, определяющих минтермы  $\bar{x}uzv, xuzv$  и  $\bar{x}uzv, xuzv$ .

Сумма этих минтермов дает

$$\bar{y}z(xv + xv + x\bar{v} + v\bar{v}) = \bar{y}z[x(v - \bar{v}) + x(\bar{v} - v)] = \bar{y}\bar{z},$$

т.е. из группы исключаются две переменные:  $x$  и  $y$ .

Третья группа состоит из восьми клеток второй и третьей строк, для которых  $v=1$ , а переменные  $x, y, z$  входят с прямыми и инверсными значениями, в связи с чем переменные  $x, y, z$  из этой группы могут быть исключены. Сумма минтермов обеих строк будет равна  $v$ .

На основании проведенных операций получаем минимальную функцию, выраженную в ДНФ (дизъюнктивная нормальная форма):

$$F = \bar{x}uz + \bar{y}\bar{z} + v.$$

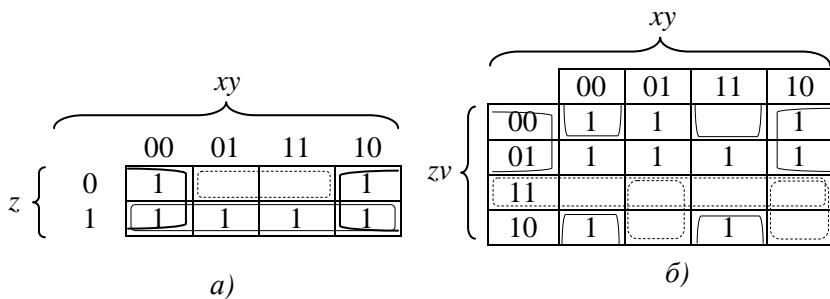
Карта Карно позволяет также провести минимизацию той же функции в КНФ (конъюнктивная нормальная форма) по нулевым значениям минтермов, находящихся в пустых клетках карты и определяющих нулевое значение функции, т.е. ее инверсное значение  $\bar{F}$ .

Порядок проведения минимизации сохраняется прежним. Минимизирующие контуры, охватывающие соседние клетки с нулевым минтермом рассматриваемой функции, показаны на рис. 17.4 пунктиром. Из карты Карно находим:

$$\bar{F} = \bar{x}uzv + yzv + xzv + x\bar{y}v.$$

Воспользовавшись инверсным преобразованием (17.5), находим минимальную функцию, выраженную в КНФ, равносильную ДНФ:

$$F = (x + y + \bar{z} + v)(\bar{y} + z + v)(\bar{x} + \bar{z} + v)(\bar{x} + \bar{y} + v).$$



**Рис. 17.5. Карта Карно для трех (а) и для четырех (б) переменных**

Минимизация функции в ДНФ или КНФ равноправна. Представление результата минимизации в ДНФ или КНФ зависит от вида функции и состава используемых логических элементов. Реализация функции в ДНФ требует преимущественного использования логических элементов И (И-НЕ), а в КНФ –логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ).

При использовании логических элементов И (И-НЕ) логическую функцию целесообразно представить в виде произведения переменных, а логических элементов ИЛИ (ИЛИ-НЕ) в виде суммы переменных. Задачу решают, воспользовавшись правилом двойной инверсии и теоремой де Моргана. Для рассматриваемой функции соответственно имеем:

$$F = \overline{\overline{x}} \overline{\overline{y}} z \overline{y} \overline{z} v,$$

$$F = \overline{\overline{x}} + \overline{y} + \overline{z} + v + \overline{y} + \overline{z} + v + x + \overline{z} + v + x + y + v.$$

В качестве примеров определим минимальные функции в ДНФ и КНФ, представленные в виде карт Карно для трех переменных (рис. 17.5 а) и четырех переменных (рис. 17.5, б).

При нахождении минимальной функции в ДНФ, представленной картой Карно на рис. 17.4, группировочные контуры должны охватывать мinterмы крайних столбцов 1 и 4.

Карта Карно для трех (а) и для четырех (б) переменных (первый контур) и мinterмы нижней строки (второй контур) представлены на рис. 17.5.

В первой группе минтермов результат не зависит от значений  $x$  и  $z$ , так как они могут принимать либо состояние «0», либо состояние «1».

Переменные  $x$  и  $z$  можно исключить. В итоге первое слагаемое определяемой минимальной функции равно  $\bar{y}$ . Во второй группе минтермов результат не зависит от значений  $x$  и  $y$ , следовательно, второе слагаемое определяется переменной  $z$ .

Таким образом, имеем минимальную функцию в ДНФ

$$F_1 = \bar{y} + z$$

или

$$F_1 = \overline{\bar{y}z}.$$

Минимальную функцию в КНФ находят из группировки двух пустых клеток карты:

$$\overline{F_1} = \bar{y}\bar{z},$$

откуда

$$F_1 = \bar{y} + z,$$

т.е. дизъюнктивная и конъюнктивная минимальные формы рассмотренной функции совпадают.

Для получения минимальной функции в ДНФ, представленной картой Карно на рис.17.5, б), необходимо составить три минимизирующих контура. В первый контур входят нижняя и верхняя клетки крайнего левого столбца, откуда определяем второе слагаемое  $xyv$ . И наконец третий контур охватывает две верхние строки карты с результатами  $\bar{z}$ . Таким образом, получаем минимальную функцию в ДНФ:

$$F_2 = \overline{x}\overline{y}\overline{v} + xy\bar{v} + \bar{z}$$

или

$$F_2 = \overline{\overline{x}\overline{y}\overline{v}} \\ F_2 = \overline{x}\overline{y}\overline{v}x\overline{y}vz.$$

Минимальную функцию в КНФ находят из трех контуров, охватывающих пустые клетки:

$$\bar{F}_2 = \bar{x}\bar{y}z + x\bar{y}\bar{z} + zv$$

с прямым значением

$$\bar{F}_2 = (x + \bar{y} + \bar{z})(\bar{x} + y + \bar{z})(\bar{z} + \bar{v})$$

или

$$\overline{\overline{F_2}} = \overline{\overline{x + y + z}} \cdot \overline{\overline{x + y + z}} \cdot \overline{\overline{z + v}}.$$

Нахождение логических функций и последующую их минимизацию широко применяют при проектировании логических схем комбинационного типа.

### 17.3. Логический элемент ИЛИ

Логические элементы предназначены для реального выполнения различных логических операций над дискретными электрическими сигналами при двоичном способе их представления. К наиболее широко применяемым элементам можно отнести логические элементы ИЛИ, И, НЕ, различные комбинированные элементы – триггеры, счетчики, дешифраторы и т.д.

Элементарный логический элемент ИЛИ имеет два входа и один выход. Условное обозначение показано на рис. 17.6, а. Он выполняет операцию логического сложения (дизъюнкция) в

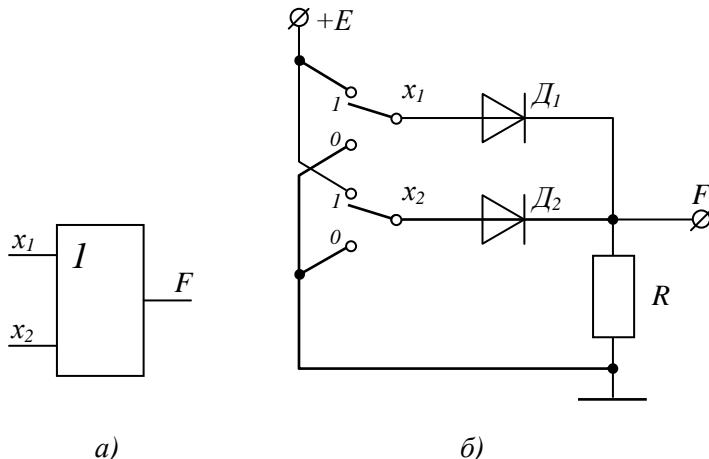


Рис. 17.6. Логический элемент ИЛИ: а) условное обозначение; б) схема с двумя входами на диодах

виде:

$$F=x_1+x_2,$$

где  $F$ - логическая функция;  $x_1$  и  $x_2$ - входные сигналы, принимаемые значения 0 или 1 (аргументы).

Здесь выходной сигнал  $F$  принимает значения в соответствии с таблицей 17.1, правила 1-4.

Наиболее просто элемент ИЛИ можно реализовать на полупроводниковых диодах, приведенных на рис.17.6, б. Логическая единица на выходе создается передачей входного сигнала (напряжения) вследствие отпирания соответствующего диода. К диодам, для которых входной сигнал равен 0, прикладывается нулевой или отрицательный потенциал относительно общей точки, и поэтому они находятся в закрытом состоянии. При применении многовходовых логических элементов ИЛИ неиспользуемые входы заземляют и этим исключают возможность прохождения помех.

#### 17.4. Логический элемент И

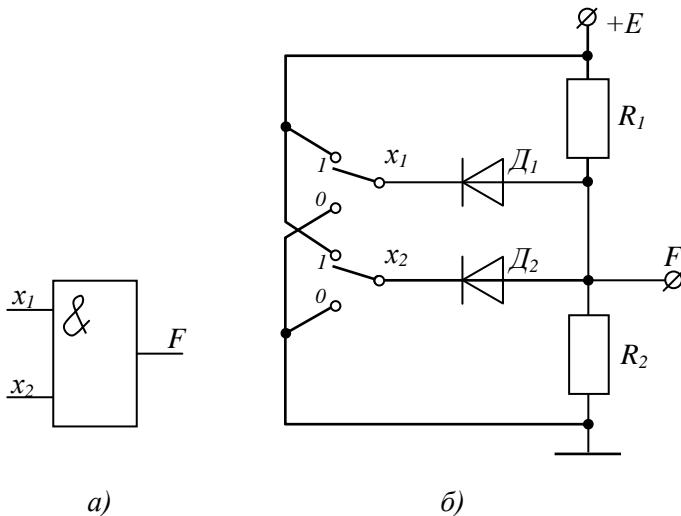
Вторым простейшим логическим элементом является элемент И, выполняющий операцию логического умножения, в соответствии с таблицей 17.1, правила 6-9. Его условное обозначение показано на рис. 17.7, а. Выходная функция с двумя входами имеет вид:

$$F=x_1 \cdot x_2.$$

Функция  $F$  будет иметь значение логической единицы, если и на первом входе  $x_1$ ; и на втором входе  $x_2$  будут поданы высокие потенциалы, соответствующие логической единице - 1. Если же хотя бы один из его входных аргументов равен нулю, то выходная функция  $F=0$ .

Простейшая схема элемента И на двух диодах приведена на рис. 17.7, б. Эта схема отличается от элемента ИЛИ обратным включением диодов  $D_1$  и  $D_2$  и наличием резистора  $R$ , подключенного к шине «+».

Схема работает следующим образом. При всех входных сигналах, равных 1, на катодах диодов имеется положительный потенциал относительно общей точки и диоды  $D_1$  и  $D_2$  закрыты.



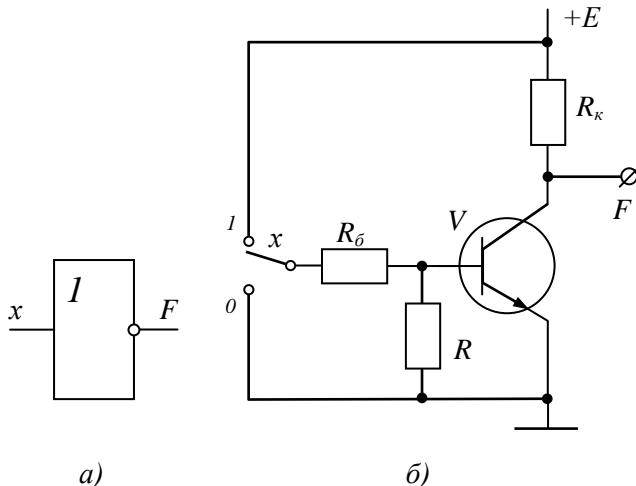
**Рис. 17.7. Логический элемент И: а)- условное обозначение; б)- схема с двумя входами на диодах**

На выходе  $F$  создается напряжение, равное  $ER_2/(R_1+R_2)$ , соответствующее значению логической единицы. При нулевом значении сигнала хотя бы на одном из входов соответствующий диод будет шунтировать резистор  $R_2$ , выполняяющий роль нагрузки. Потенциал на выходе при этом определяется падением напряжения на открытом диоде и близко к нулю, т.е.  $F=0$ .

В случае применения логического элемента И, имеющего число входов, больше количества входных сигналов, неиспользуемые входы соединяют с шиной «+». При этом неиспользуемые диоды будут находиться в закрытом состоянии.

## 17.5. Логический элемент НЕ

Логический элемент НЕ имеет один вход и один выход. Его условное обозначение приведено на рис. 17.8, а.



**Рис. 17.8. Логический элемент НЕ: а) условное обозначение; б) ключевая схема на транзисторе V**

Элемент НЕ выполняет операцию инверсии (отрицание) входной величины. Иногда его называют инвертором. Реализуемая им функция имеет вид:

$$F = \bar{x}.$$

Сигналу  $x=0$  на входе соответствует  $F=1$ , а сигналу  $x=1$  соответствует  $F=0$ , что соответствует правилам 5 и 10 таблицы 17.1.

Схема простейшего логического элемента НЕ на транзисторе V, работающем в ключевом режиме, приведена на рис. 17.8, б. При  $x=0$ , т.е. входное напряжение равно нулю, транзистор открыт, напряжение между коллектором и эмиттером транзистора приближенно равно напряжению источника питания E. Это означает, что функция имеет значение логической единицы, т.е.  $F=1$ . Если же на вход подавать логическую единицу  $x=1$ , транзистор открывается, напряжение между коллектором и эмиттером падает до минимального значения соответствующего логического нуля,  $F=0$ .

## 17.6. Логический элемент ИЛИ-НЕ

Логические элементы ИЛИ-НЕ и И-НЕ относятся к комбинированным логическим элементам. Условное обозначение элемента ИЛИ-НЕ показано на рис. 17.9, а. Он объединяет элементы ИЛИ НЕ с очередностью проведения операций.

Функциональная операция, выполняемая элементом ИЛИ-НЕ при двух входах, определяется выражением

$$F = \overline{x_1 + x_2}.$$

Схема логического элемента ИЛИ-НЕ приведена на рис. 17.9, б. Она представляет собой последовательное включение логического элемента, выполненного на диодах, и логического элемента НЕ на транзисторе.

При подаче на любой вход логической единицы, соответствующий диод открывается, база транзистора оказывается под высоким потенциалом, и транзистор приводится в открытое состояние. Открытое состояние транзистора приведет к падению потенциала на коллекторе, соответствующему логическому нулю, т.е.  $F=0$ . На выходе функция  $F$  принимает логическую единицу.

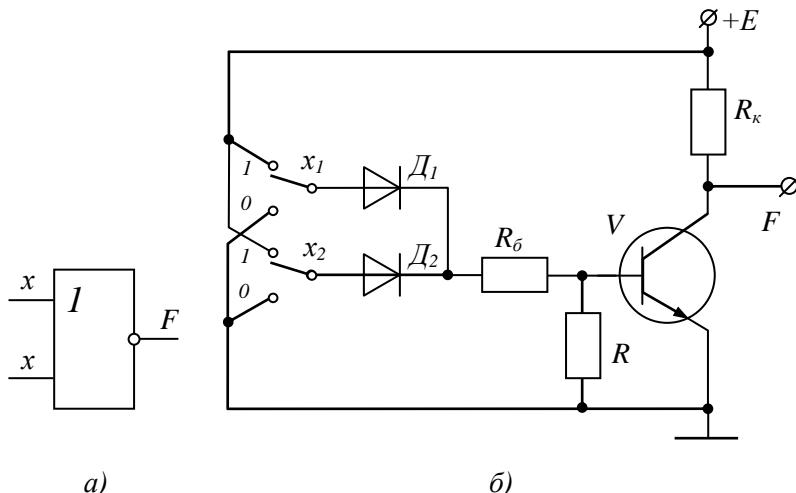


Рис. 17.9. Логический элемент ИЛИ-НЕ: а) условное обозначение; б) схема элемента

ницу только в том случае, если все входные аргументы  $x$  принимают значения логического 0.

### 17.7. Логический элемент И-НЕ

Логический элемент И-НЕ представляет собой элемент, содержащий простейшие логические элементы И и НЕ с соответствующей последовательностью выполнения операций. Логическая функция элемента для двухвходового элемента имеет вид:

$$F = \overline{x_1 \cdot x_2}.$$

Условное обозначение показано на рис. 17.10, *a*. Схема логического элемента, содержащая два элементарных логических элемента И и НЕ, приведена на рис. 17.10, *б*.

При логических единицах на обоих входах диоды  $D_1, D_2$ , закрыты. Образуется цепь  $+E - R_\delta - D_3 - D_4$ , которая обеспечивает протекание тока базы  $I_\delta = E/R_\delta$  транзистора. Транзистор открывается, и функция  $F$  принимает значение логического нуля  $F=0$ .

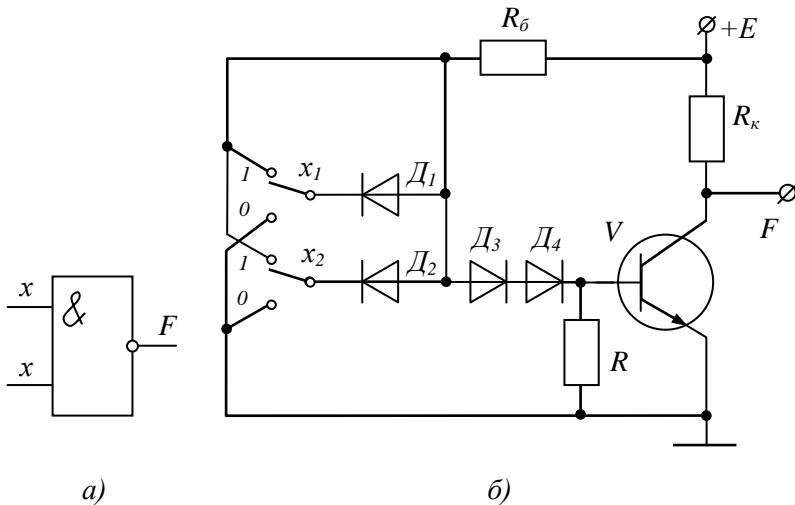


Рис.17.10. Логический элемент И-НЕ: *а*) условное обозначение; *б*) схема элемента

При логическом нуле, например, на входе  $x_1$  открывается диод  $D_1$ , шунтируя цепь  $D_3$ - $D_4$ -эмиттерный переход транзистора  $V$ . Ток базы транзистора равен нулю, транзистор закрыт и поэтому  $F=1$ .

Потенциал на анодах диодов  $D_1$  и  $D_2$  даже при открытых диодах больше нуля, поскольку любой полупроводник имеет некоторое внутреннее сопротивление. Этот потенциал в отсутствие диодов  $D_3$  и  $D_4$  мог бы привести к отпиранию транзистора. При их введении напряжение между анодами диодов  $D_1$ ,  $D_2$  и эмиттером транзистора будет приложено к диодам, а напряжение между базой и эмиттером близко к нулю.

## 17.8. Триггеры

Узел, способный сохранять двоичную информацию (0 и 1) после окончания действия входных импульсов, называется триггером.

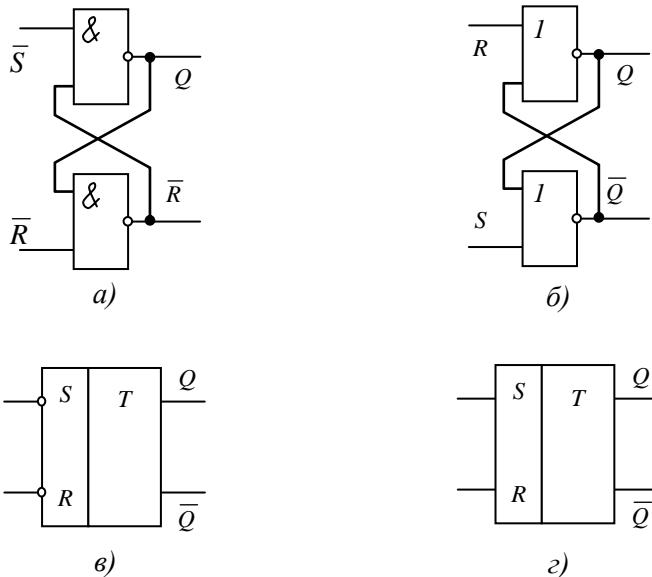
Такое свойство обусловлено наличием в устройстве обратной связи. Их выполняют либо из логических элементов ИЛИ, И, или как завершенный функциональный элемент.

По функциональному признаку различают  $R-S$ ,  $D$ ,  $T$ ,  $J-K$  и другие триггеры, а по способу управления бывают асинхронные и синхронные (тактируемые).

В асинхронных триггерах переключение состояния осуществляется воздействием на информационный вход, а в синхронных, помимо информационных входов, имеется вход тактовых импульсов. Их переключение производится только при наличии разрешающего импульса на тактовом входе.

Схема  $R-S$  асинхронного триггера на элементах ИЛИ-НЕ показана на рис. 17.11, *a*. Триггер имеет два входа  $\bar{S}$ ,  $\bar{R}$  и два выхода  $Q$ ,  $\bar{Q}$ . Он характеризуется двумя состояниями: логической «1» и логического «0». Состоянию логической «1» соответствует  $Q=1$ ,  $\bar{Q}=0$ ; состоянию логического «0» будет соответствовать  $Q=0$ ,  $\bar{Q}=1$ .

По первому информационному входу  $\bar{S}$  производится установка триггера в состояние логической «1», а по другому



**Рис. 17.11. Структурные схемы (а, б) асинхронных R-S триггеров на элементах И-НЕ и на ИЛИ-НЕ; а на в, г их условные обозначения соответственно**

информационному входу  $\bar{R}$  - перевод триггера в исходное состояние логического «0». Входные символы – это сокращенные обозначения по начальным буквам английских терминов  $S$ - set - установка и  $R$ - reset – сброс.

Для пояснения принципа действия триггера рассмотрим таблицу перехода состояний. В клетках указаны значения входных сигналов  $\bar{S}$  и  $\bar{R}$  в некоторый момент  $t_n$  и состояние в следующий момент времени  $t_{n+1}$  после прихода очередных импульсов.

Таблица 17.4

$t_n$		$T_{n+1}$
$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q_{n+1}$
0	1	1
1	0	0
1	1	$Q_n$
0	0	×

состояние «1», если триггер до этого находился в состоянии «0» (первая строка таблицы 17.4). Пусть  $Q=1$ ,  $\bar{Q}=0$ . Если  $\bar{S}=0$ , то независимо от значения сигнала на втором входе элемента  $\mathcal{E}_1$  И-НЕ  $Q=1$ . На обоих входах элемента  $\mathcal{E}_2$  присутствуют логические «1». Это обеспечивает  $\bar{Q}=0$ . При  $Q=0$  и  $\bar{Q}=1$  сигнал  $\bar{S}=0$  вызывает переключение элемента  $\mathcal{E}_1$  в состояние логической «1» и соответственно элемента  $\mathcal{E}_2$  в состояние логического «0» вследствие появления и на его левом входе логической «1».

При противоположном соотношении сигналов  $\bar{S}=1$  и  $\bar{R}=0$  происходит либо подтверждение нулевого состояния триггера  $Q=0$ ,  $\bar{Q}=1$ , либо его переключение из состояния «1» в состояние «0», соответствующего второй строке таблицы 17.4.

Значениям сигналов на входе  $\bar{S}=\bar{Q}=1$  соответствует сохранение триггером предыдущего состояния (третья строка сверху в таблице состояния). Пусть до появления такой комбинации сигналов на входах в триггере была записана логическая «1» ( $Q=1$ ,  $\bar{Q}=0$ ). При наличии  $\bar{S}=\bar{Q}=1$  имеем на обоих входах элемента  $\mathcal{E}_2$  по логической «1». Это обусловливает  $\bar{Q}=0$ . На нижнем входе  $\mathcal{E}_1$  будет логический «0», что дает  $Q=1$ .

При комбинации  $\bar{S}=\bar{Q}=0$  (последняя строка в таблице 17.4) триггер принимает неопределенное значение и поэтому последняя комбинация входных сигналов является запрещенной.

На рис. 17.11, б показана схема асинхронного R-S триггера на двухвходовых логических элементах ИЛИ-НЕ. Триггер управляется прямыми значениями входных сигналов. Работу схемы иллюстрирует таблица состояний (таблица 17.5). В отличие от предыдущей схемы, здесь  $S=R=1$  является запрещенной.

При работе асинхронных триггеров возможны нарушения

Таблица 17.5

$t_n$		$T_{n+1}$
$S$	$Q$	$Q_{n+1}$
1	0	1
0	1	0
0	0	$Q_n$
1	1	×

логических связей, обусловленные тем, что выходные сигналы обратной связи различных элементов образуются не одновременно. Вследствие этого нарушается нормальная работа асинхронного триггера и появляются ложные сигналы на его выходе. Эти недостатки устраняются в синхронных триггерах.

## 17.9. Дешифраторы

Позиционный принцип управления применяется в автоматических коробках передач современных автомобилей. Здесь выходным элементом обычно является соленоид рычага коробки передач, а в качестве входных величин – положение преобразователя скорости движения автомобиля, положение преобразователя воздушной заслонки двигателя внутреннего сгорания, частота вращения коленчатого вала двигателя, положение рычага переключения коробки передач и т.д.

Позиционный принцип реализуется построением комбинационных схем, заключающихся в следующем: по желаемому алгоритму работы объекта находят управляющее воздействие (функцию) от входных сигналов (переменных). Затем по найденной функции синтезируют логическую схему ее реализации.

Комбинационную логическую схему, в которой каждой из комбинаций сигналов на входах соответствует сигнал только на одном из его выходов, называют дешифратором. На этом принципе можно также построить комбинационную схему, выдающую сигналы на любом количестве выходов.

Дешифраторы предназначены для распознавания кодовых комбинаций и преобразования произвольного кода в код «1 из  $n$ ».

Таблица 17.6

Входные переменные		Выходные переменные			
$x_1$	$x_2$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Каждому номеру из  $n$  выходов однозначно соответствует определенный входной код. Сигнал на этом выходе появляется только в том случае, когда входные сигналы составят необходимую кодовую комбинацию.

В случае  $m$ -разрядного кода количество различных кодовых комбинаций составляет  $2^m$ .

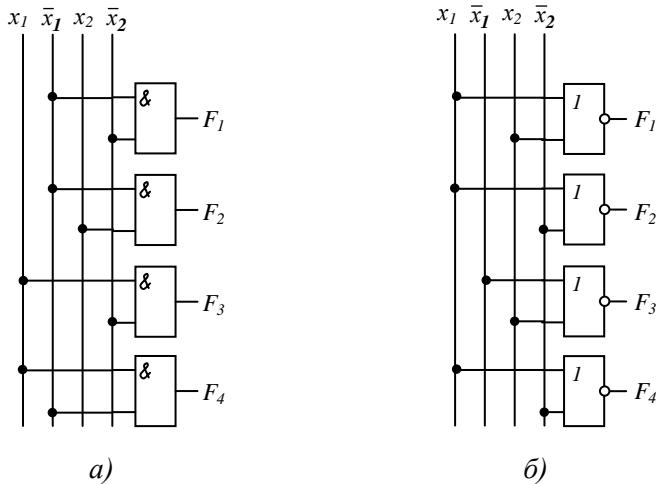


Рис. 17.12. Схема полного дешифратора с двумя входами и четырьмя выходами: а) на элементе И; б) схема на элементе ИЛИ-НЕ

Это значение определяет максимальное число выходов дешифратора. Дешифратор, имеющий  $m$  входов и  $2^m$  выходов, называется полным.

Если прямые и инверсные сигналы управления подаются по разным шинам, как это делается в схемах с триггерами, то число входов удваивается и становится равным  $2m$ . Дешифратор с  $2m$  входами и  $2^m$  выходами называют матричным прямоугольным дешифратором. Рассмотрим простейший дешифратор с  $m=2$ . Работа описывается таблицей истинности (таблица 17.6).

Аналогично создадим схему полного дешифратора с двумя переменными с инверсиями. Для этого напишем логические уравнения для каждого выхода:

$$F = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 ; F = \bar{x}_1 \cdot x ; F = x_1 \cdot \bar{x}_2 ; F = x_1 \cdot x_2. \quad (17.6)$$

Для реализации этих уравнений необходимы четыре двухпроводных элемента И, способных образовать конъюнктивные комбинации прямых и инверсных входных сигналов. Схемы таких полных дешифраторов приведены на рис. 17.12 а и б. Сигнал логической «1», например, на третьем выходе будет

только тогда, когда на вход будет подан единичный сигнал на прямой вход  $x_1$  и инверсный вход  $\bar{x}_2$ , т.е. при

$$x_1=1, \bar{x}_2=1.$$

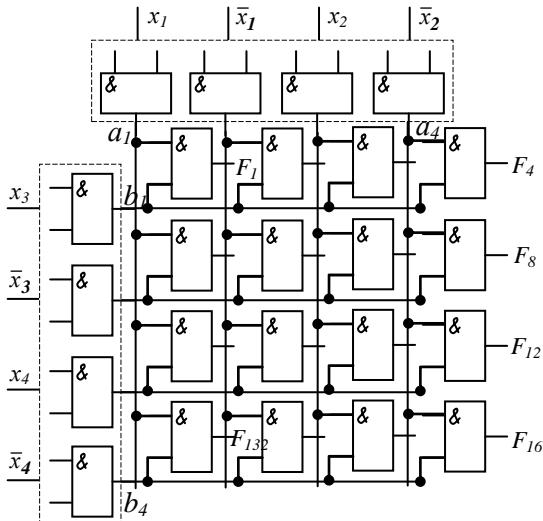
Аналогично образуются сигналы и на других выходах.

Дешифратор может быть построен также и на элементах ИЛИ-НЕ (рис.17.12 б). Так как логическая функция ИЛИ-НЕ образует конъюнкцию инверсии переменных  $x$ , то для сохранения таблицы истинности необходимо инвертировать все входные сигналы. По теореме де Моргана логические уравнения (17.6) примут вид:

$$\bar{F} = \overline{x_1 + x_2}; \quad \bar{F} = \overline{x_1 + \bar{x}_2}; \quad \bar{F} = \overline{\bar{x}_1 + x_2}; \quad \bar{F} = \overline{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}.$$

Описанные дешифраторы называют одноступенчатыми или линейными. Наиболее просто они реализуются, когда число разрядов кода равно числу входов элемента И. В противном случае переходят к многоступенчатой дешифрации.

На рис.17.13 изображена схема двухступенчатого пря-



**Рис.17.13. Схема двухступенчатого прямоугольного дешифратора четырехразрядного кода с четырьмя входами и шестнадцатью выходами**

моугольного дешифратора четырехразрядного кода, имеющего  $m=4$  и  $2^m=16$  выходов. Дешифрация осуществляется в два этапа. Первичные дешифраторы, выполненные по схеме 17.12, *a*, обеспечивают дешифрацию двух разрядов четырехразрядного кода каждый. Сигналы *a* и *b*, образованные выходными цепями этих дешифраторов, подаются на прямоугольную матрицу, образованную 16 элементами И. Таким образом, каждой комбинации промежуточных функций *a* и *b* соответствует появление сигнала на единственном выходе дешифратора. Схема прямоугольного дешифратора базируется на алгебраическом равенстве

$$2^{(m_1+m_2)} = 2^{m_1} \cdot 2^{m_2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$ - число разрядов кода первичных дешифраторов.

### **Контрольные вопросы**

1. Покажите основные правила и аксиомы в алгебре логики.
2. Приведите основные тождества, относящиеся к двум и трем переменным.
3. Объясните, в чем заключаются законы инверсии для логического сложения и умножения?
4. Для каких целей производят минимизацию логической функции и какие методы применяются?
5. Что из себя представляет метод Карно, для чего он применяется?
6. Какие элементарные логические элементы Вы знаете и какие логические операции они выполняют?
7. Покажите основные элементарные логические элементы на диодах и объясните принципы их работы.
8. Какие логические элементы способны сохранять двоичную информацию, перечислите их?
9. Какие дешифраторы называются полными, матричными прямоугольными?
10. Покажите принцип построения двухступенчатого прямоугольного дешифратора.

## **ГЛАВА 18. Принципы регулирования и управления**

### **18.1. Принцип работы регулятора напряжения**

Регулятор напряжения поддерживает напряжение бортовой сети в заданных пределах во всех режимах работы при изменении частоты вращения ротора генератора, электрической нагрузки, температуры окружающей среды. Кроме того, он может выполнять дополнительные функции: защищать элементы генераторной установки от аварийных режимов и перегрузки, автоматически включать в бортовую сеть цепь обмотки возбуждения или систему сигнализации аварийной работы генераторной установки.

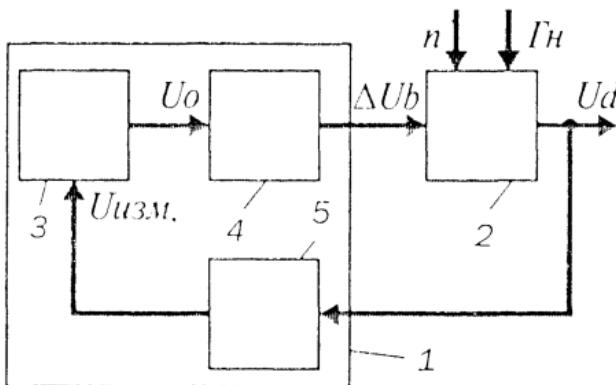
Все регуляторы напряжения работают по единому принципу. Напряжение генератора определяется тремя факторами - частотой вращения ротора, силой тока, отдаваемой генератором в нагрузку, и величиной магнитного потока, создаваемой током обмотки возбуждения. Чем выше частота вращения ротора и меньше нагрузка на генератор, тем выше напряжение генератора. Увеличение силы тока в обмотке возбуждения увеличивает магнитный поток и с ним напряжение генератора, снижение тока возбуждения уменьшает напряжение. Все регуляторы напряжения, отечественные и зарубежные, стабилизируют напряжение изменением тока возбуждения. Если напряжение возрастает или уменьшается, регулятор соответственно уменьшает или увеличивает ток возбуждения и вводит напряжение в нужные пределы.

Блок-схема регулятора напряжения представлена на рис. 18.1.

Регулятор 1 содержит измерительный элемент 5, элемент сравнения 3 и регулирующий элемент 4. Измерительный элемент воспринимает напряжение генератора 2  $U_d$  и преобразует его в сигнал  $U_{изм.}$ , который в элементе сравнения сравнивается с эталонным значением  $U_{эт.}$ .

Если величина  $U_{изм.}$  отличается от эталонной величины  $U_{эт.}$ , на выходе измерительного элемента появляется сигнал  $U_0$ , который активизирует регулирующий элемент; изменяющий ток в обмотке возбуждения так, чтобы напряжение генератора

вернулось в заданные пределы.



**Рис. 18.1. Блок схема регулятора напряжения: 1 – регулятор; 2 – генератор; 3 – элемент сравнения; 4 – регулирующий элемент; 5 – измерительный элемент**

Таким образом, к регулятору напряжения обязательно должно быть подведено напряжение генератора или напряжение из другого места бортовой сети, где необходима его стабилизация, например, от аккумуляторной батареи, а также подсоединенена обмотка возбуждения генератора. Если функции регулятора расширены, то и число подсоединений его в схему расстет.

Чувствительным элементом электронных регуляторов напряжения является входной делитель напряжения. С входного делителя напряжение поступает на элемент сравнения, где роль эталонной величины играет обычно напряжение стабилизации стабилитрона. Стабилитрон не пропускает через себя ток при напряжении ниже напряжения стабилизации и пробивается, т. е. начинает пропускать через себя ток, если напряжение на нем превысит напряжение стабилизации. Напряжение же на стабилитроне остается при этом практически неизменным. Ток через стабилитрон включает электронное реле, которое коммутирует цепь возбуждения таким образом, что ток в обмотке возбуждения изменяется в нужную сторону. В вибрационных и контакт-

но-транзисторных регуляторах чувствительный элемент представлен в виде обмотки электромагнитного реле, напряжение к которой, впрочем, тоже может подводиться через входной делитель, а эталонная величина – это сила натяжения пружины, противодействующая силе притяжения электромагнита. Коммутацию в цепи обмотки возбуждения осуществляют контакты реле или, в контактно-транзисторном регуляторе, полупроводниковая схема, управляемая этими контактами. Особенностью автомобильных регуляторов напряжения является то, что они осуществляют дискретное регулирование напряжения путем включения и выключения в цепь питания обмотки возбуждения (в транзисторных регуляторах) или последовательно с обмоткой дополнительного резистора (в вибрационных и контактно-транзисторных регуляторах), при этом меняется относительная продолжительность включения обмотки или дополнительного резистора.

Поскольку вибрационные и контактно-транзисторные регуляторы представляют лишь исторический интерес, а в отечественных и зарубежных генераторных установках в настоящее время применяются электронные транзисторные регуляторы, удобно рассмотреть принцип работы регулятора напряжения на примере простейшей схемы, близкой к отечественному регулятору напряжения Я112А1 и регулятору ЕЕ14V3 фирмы BOSCH (рис. 18.2).

Регулятор 2 на схеме работает в комплекте с генератором 1, имеющим дополнительный выпрямитель обмотки возбуждения. Чтобы понять работу схемы, следует вспомнить, что, как было показано выше, стабилитрон не пропускает через себя ток при напряжениях ниже величины напряжения стабилизации. При достижении напряжением этой величины стабилитрон пробивается, и по нему начинает протекать ток. Транзисторы же пропускают ток между коллектором и эмиттером, т. е. открыты, если в цепи база-эмиттер ток протекает, и не пропускают этот ток, т. е. закрыты, если базовый ток прерывается.

Напряжение к стабилитрону VD1 подводится от выхода генератора Д через делитель напряжения на резисторах R1, R2. Пока напряжение генератора невелико, и на стабилитроне оно ниже напряжения стабилизации, стабилитрон закрыт, ток через

него, а следовательно, и в базовой цепи транзистора VT1 не протекает, транзистор VT1 закрыт. В этом случае ток через резистор R6 от вывода Д поступает в базовую цепь транзистора VT2, он открывается, через его переход эмиттер-коллектор начинает протекать ток в базе транзистора VT3, который открывается тоже. При этом обмотка возбуждения генератора оказывается через переход эмиттер-коллектор VT3 подключена к цепи питания. Соединение транзисторов VT2, VT3, при котором их коллекторные выводы объединены, а питание базовой цепи одного транзистора производится от эмиттера другого, называется схемой Дарлингтона. При таком соединении оба транзистора могут рассматриваться как один составной транзистор с большим коэффициентом усиления. Обычно такой транзистор и выполняется на одном кристалле кремния. Если напряжение генератора возросло, например, из-за увеличения частоты вращения его ротора, то возрастает и напряжение на стабилитроне VD1.

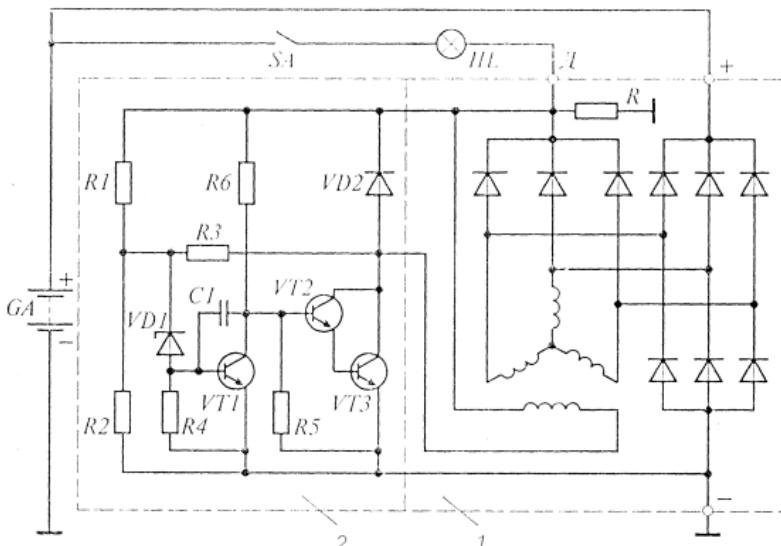


Рис. 18.2. Схема электронного транзисторного регулятора напряжения: 1 – генератор; 2 – регулятор

При достижении этим напряжением величины напряжения стабилизации стабилитрон VD1 пробивается, ток через него начинает поступать в базовую цепь транзистора VT1, который открывается и своим переходом эмиттер-коллектор закорачивает вывод базы составного транзистора VT2, VT3 на «массу». Составной транзистор закрывается, разрывая цепь питания обмотки возбуждения. Ток возбуждения спадает, уменьшается напряжение генератора, закрываются стабилитрон VD2, транзистор VT1, открывается составной транзистор VT2, VT3, обмотка возбуждения вновь включается в цепь питания, напряжение генератора возрастает и т.д., процесс повторяется.

Таким образом регулировка напряжения генератора регулятором осуществляется дискретно через изменение относительного времени включения обмотки возбуждения цепи питания. Если частота вращения генератора возросла, или нагрузка его уменьшилась, время включения обмотки уменьшается, если частота вращения уменьшилась или нагрузка возросла – увеличивается.

В схеме регулятора по рис. 18.2 имеются элементы, характерные для схем всех применяющихся на автомобилях регуляторов напряжения. Диод VD2 при закрытии составного транзистора VT2, VT3 предотвращает опасные всплески напряжения, возникающие из-за обрыва цепи обмотки возбуждения со значительной индуктивностью.

В этом случае ток обмотки возбуждения может замыкаться через этот диод, и опасных всплесков напряжения не происходит. Поэтому диод VD2 называется гасящим. Сопротивление R3 является сопротивлением жесткой обратной связи. При открытии составного транзистора VT2, VT3 оно оказывается подключенным параллельно сопротивлению R2 делителя напряжения. При этом напряжение на стабилитроне VD2 резко уменьшается, что ускоряет переключение схемы регулятора и повышает частоту этого переключения. Это благотворно сказывается на качестве напряжения генераторной установки. Конденсатор C1 является своеобразным фильтром, защищающим регулятор от влияния импульсов напряжения на его входе.

Вообще конденсаторы в схеме регулятора либо предотвращают переход этой схемы в колебательный режим и возмож-

ность влияния посторонних высокочастотных помех на работу регулятора, либо ускоряют переключения транзисторов.

В последнем случае конденсатор, заряжаясь в один момент времени, разряжается на базовую цепь транзистора в другой момент, ускоряя броском разрядного тока переключение транзистора и, следовательно, снижая потери мощности в нем и его нагрев.

Из рис. 18.2 хорошо видна роль лампы контроля работоспособного состояния генераторной установки HL.

При неработающем двигателе внутреннего сгорания замыкание контактов выключателя зажигания SA позволяет току от аккумуляторной батареи GA через эту лампу поступать в обмотку возбуждения генератора. Этим обеспечивается первоначальное возбуждение генератора. Лампа при этом горит, сигнализируя, что в цепи обмотки возбуждения нет обрыва.

После запуска двигателя, на выводах генератора Д и «+» появляется практически одинаковое напряжение, и лампа гаснет. Если генераторная установка при работающем двигателе автомобиля не развивает напряжения, то лампа HL продолжает гореть и в этом режиме, что является сигналом об отказе генераторной установки или обрыве приводного ремня.

Введение резистора R в генераторную установку способствует расширению диагностических способностей лампы HL. При наличии этого резистора, если при работающем двигателе автомобиля произойдет обрыв цепи обмотки возбуждения, то лампа HL загорится.

Аккумуляторная батарея для своей надежной работы требует, чтобы с понижением температуры электролита напряжение, подводимое к батарее от генераторной установки, несколько повышалось, а с повышением температуры – понижалось.

Для автоматизации процессов изменения уровня поддерживаемого напряжения применяется датчик, помещенный в электролит аккумуляторной батареи и включаемый в схему регулятора напряжения. В простейшем случае термокомпенсация в регуляторе подобрана таким образом, что в зависимости от температуры поступающего в генератор охлаждающего воздуха напряжение генераторной установки изменяется в заданных пределах.

В рассмотренной схеме регулятора напряжения, как и во всех регуляторах аналогичного типа, частота переключений в цепи обмотки возбуждения изменяется по мере изменения режима работы генератора. Нижний предел этой частоты составляет 25-50 Гц.

Однако имеется и другая разновидность схем электронных регуляторов, в которых частота переключения строго задана. Регуляторы такого типа оборудованы широтно-импульсным модулятором (ШИМ), который и обеспечивает заданную частоту переключения. Применение ШИМ снижает влияние на работу регулятора внешних воздействий, например, уровня пульсаций выпрямленного напряжения и т. п.

В настоящее время все больше зарубежных фирм переходит на выпуск генераторных установок без дополнительного выпрямителя. Для автоматического предотвращения разряда аккумуляторной батареи при неработающем двигателе автомобиля в регулятор такого типа заводится фаза генератора. Регуляторы, как правило, оборудованы ШИМ, который, например, при неработающем двигателе переводит выходной транзистор в колебательный режим, при котором ток в обмотке возбуждения невелик и составляет доли ампера.

После запуска двигателя сигнал с вывода фазы генератора переводит схему регулятора в нормальный режим работы.

Схема регулятора осуществляет в этом случае и управление лампой контроля работоспособного состояния генераторной установки.

## **18.2. Датчики электронных систем управления двигателем**

### **18.2.1. Измерители расхода воздуха**

В измерителе расхода воздуха воздушный поток воздействует на заслонку, закрепленную на оси в специальном канале. Поворот заслонки потенциометром преобразуется в напряжение, пропорциональное расходу воздуха. Воздействие воздушного потока на заслонку уравновешивается пружиной. Демпфер с пластиной, выполненной как одно целое с измерительной заслонкой, служит для гашения колебаний, вызванных пульсаци-

ями воздушного потока и динамическими воздействиями, характерными для движущегося автомобиля. На входе в измеритель расхода воздуха встроен датчик температуры поступающего в двигатель воздуха. Недостатком измерителя расхода является наличие подвижных деталей и скользящего контакта. Подвижных деталей не имеют измерители расхода воздуха ионизационного, ультразвукового, вихревого и термоанемометрического типов.

Термоанемометрический измеритель расхода воздуха для системы впрыскивания топлива «LH-Jetronic» представляет собой автономный блок, устанавливаемый во впускной тракт двигателя. Наиболее ответственной частью термоанемометра является внутренний измерительный канал 6 (рис. 18.3), состоящий из пластмассовых обойм, которые окружают несущие кольца нагреваемой платиновой нити 2 диаметром 100 мкм и термокомпенсационного пленочного резистора 3.

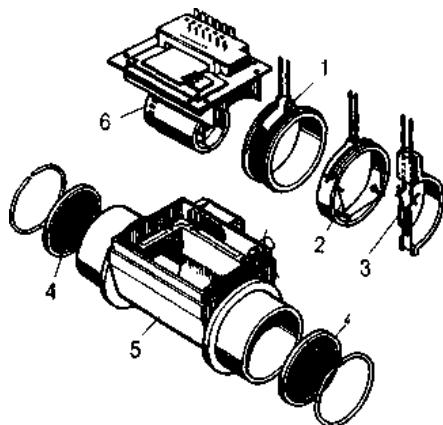
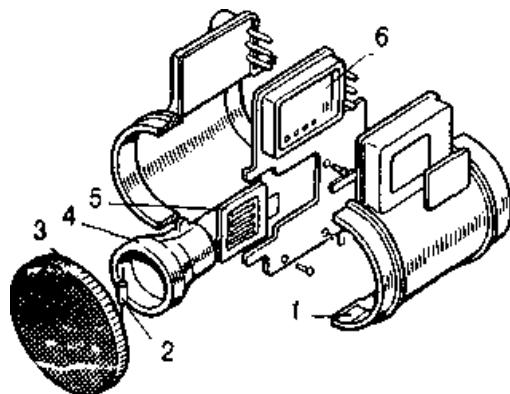


Рис. 18.3. Термоанемометрический измеритель расхода воздуха системы «LH-Jetronic»: 1 – прецизионный резистор; 2 – измерительный элемент; 3 – термокомпенсационный элемент; 4 – стабилизирующие решетки; 5 – пластмассовый корпус; 6 – внутренний измерительный канал

Корпус 5 имеет камеру для размещения электронного блока, который поддерживает постоянным перегрев нити относительно потока на уровне 150 °С путем регулирования силы тока измерительного моста. Выходным параметром измерителя расхода воздуха служит падение напряжения на прецизионном резисторе 1. На входе и выходе основного канала измерителя расхода воздуха установлены защитные сетки, которые одновременно выполняют функции стабилизирующих элементов.

На рис. 18.4 показан автомобильный термоанемометрический измеритель расхода воздуха с пленочным чувствительным элементом на твердых керамических подложках. Основой конструкции является чувствительный элемент, включающий измерительный и термокомпенсационный резисторы. Пластмассовая рамка с чувствительным элементом размещается в измерительном патрубке измерителя расхода воздуха. Температура перегрева измерительного терморезистора -70 °С. Она поддерживается с помощью электронной схемы управления.



**Рис. 18.4. Термоанемометрический расходомер с пленочным чувствительным элементом:** 1 – корпус; 2 – датчик температуры воздуха; 3 – стабилизирующая решетка; 4 – внутренний измерительный канал; 5 – чувствительный элемент; 6 – электронная схема

## **18.2.2. Датчики положения и перемещения**

Для определения положений дроссельной заслонки и угловой скорости перемещения (частоты вращения) коленчатого вала применяют датчики контактного типа.

Основой потенциометрического датчика является плечочный резистор с несколькими контактными дорожками, с которыми контактируют упругие токосъемные элементы. Последние связаны с осью датчика и перемещаются вместе с ней. Токосъемные элементы обеспечивают получение сигналов ускорения при резком открытии дроссельной заслонки, о холостом ходе двигателя, информацию о положении дроссельной заслонки и полном или близком к нему открытии дроссельной заслонки.

Основные требования к датчику положения дроссельной заслонки: высокая долговечность и стабильность работы при отсутствии дребезжания контактов. Эти требования выполняются за счет подбора износостойких материалов дорожек и контактных площадок токосъемных элементов.

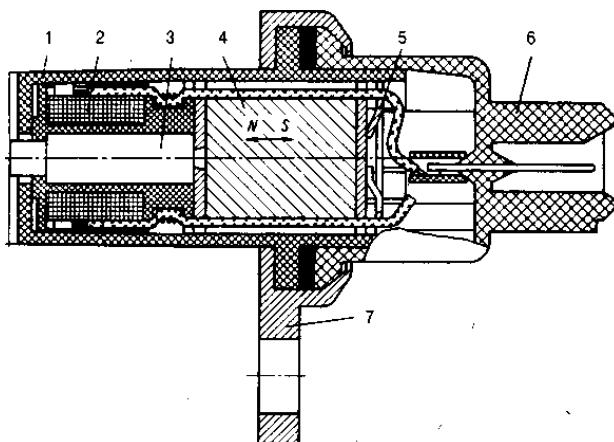
Недостатки электромеханических датчиков контактного типа отсутствуют в бесконтактных датчиках, в частности, оптоэлектронных датчиках с кодирующим диском. Разрешающая способность датчика может быть меньше  $1^\circ$  за счет применения прецизионных кодирующих дисков и оптических или фотоэлектрических устройств. Кодирующий диск имеет прорези или прозрачные площадки. По разным сторонам диска установлены источники света и фоточувствительные элементы (обычно фотодиоды). При вращении диска свет попадает на определенную комбинацию фотодиодов (фотоэлементов), что позволяет однозначно определять угол поворота диска.

Индуктивные датчики перемещения в электронных системах управления двигателем используются в основном для измерения частоты вращения коленчатого или распределительного вала двигателя. Они предназначены также для определения ВМТ первого цилиндра или другой специальной метки, служащей началом отсчета для системы управления, чем обеспечивается синхронизация функционирования системы управления с рабочим процессом двигателя.

Индукционная катушка датчика размещена вокруг постоянного магнита, полюс которого со стороны, обращенной к объекту вращения, например, к зубчатому венцу маховика, имеет магнитопровод из магнитомягкого материала. Магнитопровод установлен с небольшим зазором относительно зубьев вращающегося зубчатого венца маховика.

При перемещении зубьев относительно магнитопровода величина зазора между ними меняется. Это вызывает изменение магнитной индукции и появление двухполлярного электрического импульса в индукционной катушке. Две пикообразные полуволны импульса расположены симметрично относительно оси, проходящей через нулевую точку, а нулевая точка соответствует центру каждого зуба, что позволяет с большой точностью определить их положение.

Амплитуда выходного сигнала датчика зависит от длины воздушного зазора между магнитопроводом и маркерным зубом и от скорости изменения магнитной индукции, зависящей от скорости перемещения зуба.



**Рис. 18.5. Индуктивный датчик:** 1 – корпус; 2 – индукционная катушка; 3 – магнитопровод; 4 – магнит из феррита бария; 5 – пружинное кольцо; 6 – крышка со штекерами; 7 – фланец

Индуктивные датчики относятся к числу наиболее надежных датчиков в электронных системах управления автомобильных двигателей. Конструкция индуктивного датчика показана на рис. 18.5.

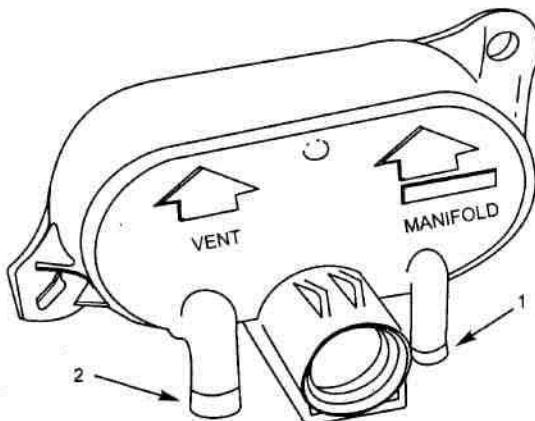
### 18.2.3. Датчики барометрического давления

Такие датчики используются в системах управления двигателем при определении массы топлива по объемному расходу воздуха. Этот способ дешевле в реализации по сравнению с непосредственным измерением массового расхода воздуха, но менее точен. Способ может использоваться только для диагностики в бортовых диагностических системах второго поколения OBD-II.

Датчики барометрического (атмосферного) давления нужны для адаптации ЭБУ к перепадам высоты и изменениям погоды. Они применяются совместно с расходомером воздуха по объему. Часто это один и тот же датчик, тогда измерение атмосферного давления производится, когда зажигание включено, а двигатель еще не работает. При езде в горах иногда приходится специально останавливаться и перезапускать двигатель для адаптации системы управления подачей топлива к новой высоте.

Выпускаются и сдвоенные датчики (рис. 18.6). Вход барометрического датчика остается открытым, и на него подается атмосферное давление, вход датчика разрежения соединяется вакуумным шлангом с впускным коллектором.

Барометрические датчики и датчики давления, применяемые для измерения разрежения во впусканом трубопроводе, могут быть различных конструкций. Датчики давления дискретного действия представляют собой устройство, где замыкание и размыкание контактов происходит под действием упругой мембранны, испытывающей измеряемое давление.



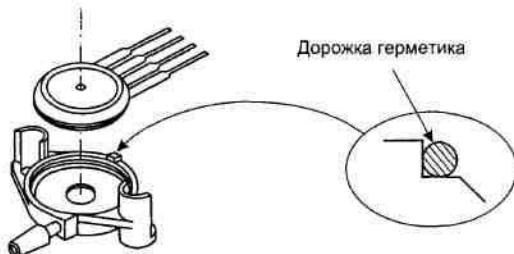
**Рис. 18.6. Комбинированный датчик барометрического давления и разряжения: 1 – вакуумный шланг; 2 – шланг в атмосферу**

Датчики давления непрерывного действия представляют собой либо потенциометр, ползунок которого связан с мембраной, либо катушку индуктивности, в которую мембрана под действием давления вдвигает магнитный сердечник.

Современные интегральные датчики (рис. 18.7) подключаются к микропроцессору ЭБУ через коммутатор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для 8-разрядного контроллера шаг дискретизации может составлять до 4 мс, для 16-разрядного – до 2 мс.

Погрешность датчика абсолютного давления во впускном коллекторе обычно около 1%.

Датчик барометрического давления работает в диапазоне 60...115 кПа, имеет погрешность около 1,5%. По краям рабочего диапазона, как по температуре, так и по давлению, погрешность растет.



**Рис. 18.7. Современный интегральный датчик давления в защитном корпусе**

Датчики абсолютного давления в двигателях с наддувом работают в диапазоне давлений 20...200 кПа.

Рассмотренные датчики имеют, как правило, интегральное исполнение и крепятся к стенкам соответствующих трубопроводов.

Широкое распространение получили полупроводниковые датчики с преобразователем давления на кремниевом кристалле, в работе которого используется пьезорезистивный эффект. На поверхности кристалла сформирован мостик сопротивлений, ток через которые изменяется под действием деформации. Затем ток усиливается и вводится температурная компенсация (рис. 18.8).

Эти датчики отличаются небольшими размерами и высокой надежностью. Интегральные датчики очень технологичны, их выходной сигнал унифицирован для подключения к аналоговым или импульсным входам микроконтроллера.

Информацию о давлении в зависимости от конструкции датчика несет величина выходного напряжения или его частота.

На автомобилях они традиционно основаны на преобразовании перемещения упругой диафрагмы в положение переключателя или движка потенциометра. На таком принципе работают все датчики давления масла в ДВС прежних конструкций. Сегодня электромеханические датчики заменяются на кремниевые или керамические интегральные. Непосредственно в корпусе датчика размещают унифицирующие преобразователи. Имеется защита от электромагнитных помех, микросхемы работают при температуре  $-40\ldots+150^{\circ}\text{C}$  в условиях вибраций, при давлении до 3440 кПа, в агрессивных химических средах. Из соображений

стоимости корпуса датчиков изготавливаются из пластмассы, устойчивой к перечисленным воздействиям.

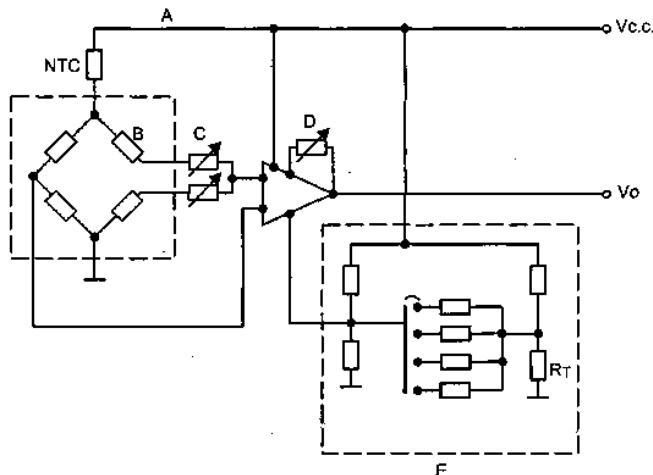


Рис. 18.8. Упрощенная электрическая схема датчика абсолютного (атмосферного) давления с цепями компенсации:  
А – цепь температурной компенсации; В – измерительный мост;  
С – подстройка нуля; Д – коэффициент усиления; Е –  
термокомпенсация усилителя

Информация о давлении масла в коробке переключения передач используется контроллером, управляющим переключением скоростей. Требования к датчику здесь такие же, как и при измерении давления масла в двигателе. Давление жидкости в тормозной гидравлической системе гораздо выше, чем в коробке переключения передач. Например, в АБС оно может достигать 3440 кПа. Давление жидкости в тормозной системе автомобиля около 1030 кПа, оно измеряется датчиками на легковых автомобилях на этапе испытаний и на тяжелых грузовиках при эксплуатации. На пассажирском автомобиле достаточно иметь один датчик давления для контроля за гидравлической системой. Например, в системе АБС-VI фирмы GM давление оценивается по току электродвигателей насосов.

## 18.3. Датчики вспомогательного электрооборудования

### 18.3.1. Датчик АБС магнитоэлектрического типа

Основной задачей антиблокировочной системы (АБС) является поддержание в процессе торможения автомобиля такого тормозящего момента, который при данном состоянии дорожного покрытия исключает возможность блокировки колес и обеспечивает максимально возможный эффект торможения. Максимальное сцепление с дорожным покрытием происходит тогда, когда шины буксируют на 15–20%. Буксование или скольжение  $S$  можно оценить следующим образом:

$$S = (V_a - \omega r_k) 100\% / V_a, \quad (18.1)$$

где  $V_a$  – скорость движения автомобиля,  $\omega r_k$  – скорость колеса в месте его соприкосновения с дорожным покрытием.

По мере возрастания  $S$  от 0 до  $S_{kp}$  постепенно увеличивается коэффициент сцепления с дорогой. Дальнейшее увеличение  $S$  приводит к уменьшению коэффициента сцепления  $f_{cl}$ . На рис. 18.9 представлена диаграмма зависимости коэффициента сцепления от скольжения  $S$ .

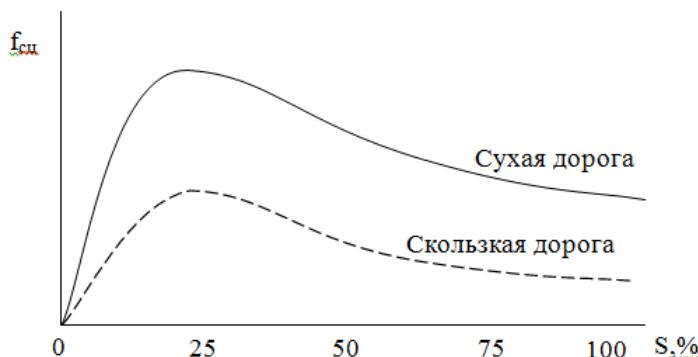


Рис. 18.9. Диаграмма зависимости коэффициента сцепления от скольжения

В таблице 18.1 приведены коэффициенты сцепления от состояния дорожного покрытия и шины.

На ровном и сухом покрытии дороги автомобиль, осна-

щенный АБС, обычно останавливается на том же расстоянии, что и автомобиль без АБС. При худшем состоянии дорожного покрытия АБС дает возможность значительно сократить тормозной путь, и при этом водитель не теряет контроля над автомобилем.

Таблица 18.1

	Состояние дор. покрытия	Состояние шины	$f_{\text{сп.}}$
1	Сухой асфальт	Новые шины	1,0
2	Мокрый асфальт	Новые шины	0,9
3	Сухой асфальт	Старые шины	0,8
4	Мокрый асфальт	Старые шины	0,7
5	Шоссе сухое	Новые шины	0,6
6	Шоссе сухое	Старые шины	0,5
7	Шоссе мокрое	Новые шины	0,4
8	Шоссе мокрое	Старые шины	0,3
9	Лед	Новые шины	0,2
10	Лед	Старые шины	0,1

С целью обеспечения высокой чувствительности АБС, требуемой для формирования системой управления оптимальных законов изменения тормозного момента, его регулирование осуществляется путем непрерывно повторяющихся с частотой 5-10 Гц циклов работы системы. У большинства современных АБС изменение давления в тормозных цилиндрах организовано по трехфазному циклу. При таком цикле, кроме процессов увеличения или уменьшения давления в рабочих цилиндрах, предусмотрена еще одна фаза, в течение которой давление остается постоянным. Такая фаза называется фазой отсечки.

Одним из элементов любой электронной системы управления агрегатами трансмиссии является преобразователь частоты вращения того или иного вала. При этом входной величиной является угловая скорость вращения вала трансмиссии, а выходным сигналом преобразователя является индуцируемая в нем ЭДС. Обычно применяются преобразователи магнитоэлектрического типа, относящиеся к генераторным преобразовате-

лям.

Он представляет систему, состоящую из двух элементов, зубчатого колеса и пальчикового магнитоэлектрического преобразователя. Число зубьев зубчатого колеса колеблется от 50 до 100, в зависимости от модели автомобиля.

Эти преобразователи преобразуют частоту вращения контролируемого вала в частоту и амплитуду ЭДС. Форма выходного сигнала представляет собой деформированную синусоиду. Частота изменения этой ЭДС строго пропорциональна частоте вращения контролируемого вала. В большинстве систем управления, содержащих магнитоэлектрический преобразователь частоты вращения вала, в качестве управляющего сигнала обычно используется только частота изменения его ЭДС, так как частотно модулированный сигнал является наиболее помехоустойчивым. В качестве преобразователя частоты вращения колеса автомобиля применяется магнитоэлектрический преобразователь пальчикового типа с открытой магнитной цепью.

Наиболее ответственной операцией при управлении является вычисление скорости движения автомобиля, причем точность и время вычислений имеют существенное значение.

Для широко распространенных трехосных грузовых автомобилей оборудовать каждое колесо датчиком скорости модулятором давления, т.е. иметь шестиканальное АБС, было бы идеально, но получится очень дорого. В настоящее время используются другие более дешевые системы АБС.

Рассмотрим передние колеса. Пусть каждое колесо оснащено датчиком, а модулятор один. Если модулятор начинает растормаживать при блокировании любого из колес, тогда получится управление по слабому колесу SL (Select Low).

Можно также, не обращая внимания на первое заблокированное колесо, сбрасывать давление в начале блокирования второго колеса. Тогда получится управление по сильному колесу SH (Select High). В первом случае уменьшается эффективность, а во втором – устойчивость.

На практике применяют промежуточный вариант – модифицированное осевое регулирование (MAR). При этом АБС начинает функционировать по слабому колесу, а затем переходит на управление по сильному, т.е. можно сэкономить на од-

ном модуляторе. Такое управление называется модифицированным осевым управлением.

Теперь рассмотрим задние колеса. Существуют следующие варианты:

- 1.На все колеса одного борта 1 датчик и 1 модулятор.
- 2.Установить 2 датчика и 1 модулятор.
- 3.Установить 2 датчика на одну ось и 1 модулятор на все 4 колеса.

В первом случае с датчиком получим индивидуальное, а в остальных косвенное управление. Во втором случае модифицированное бортовое управление. В третьем варианте модифицированное осевое, а в остальных – косвенное осевое управление.

Их выражают формулой (конфигурацией) – количество датчиков/количество модуляторов.

Существуют блоки управления, объединенные с модулятором или раздельно. При объединенном варианте облегчается монтаж, а во втором обеспечивается гибкость в размещении, так как имеются ограничения по длине соединительного трубо-проводка между модулятором и тормозной камерой.

На грузовых автомобилях в зависимости от диаметра колес число зубьев могут быть 60, 80, 100, 120. Магнитоэлектрический датчик при монтаже вставляется в гнездо до упора с зубчатым колесом, а при начале движения за счет бieniaя отводится назад, и автоматически устанавливается минимальный зазор.

Пальчиковый преобразователь частоты вращения состоит из чувствительного элемента магнитоэлектрического типа, содержащего постоянный магнит и обмотку, и зубчатого колеса. Чувствительный элемент крепится к неподвижной части устройства, например, на кронштейне подвески автомобиля, корпусе подшипника и т.д. Зубчатое колесо устанавливается на ступице контролируемого вращающегося маховика или колеса автомобиля. Работа основана на наведении ЭДС в катушке при изменении магнитного потока из-за изменения магнитного сопротивления магнитной цепи.

Достоинством преобразователя является его жесткость, монолитность, отсутствие труящихся элементов и контактов. Недостатком является сложность изготовления, обеспечение соос-

ности всей магнитной системы и необходимость добиваться высокой точности изготовления поверхностей магнита и стержня. На рис. 18.10 и 18.11 представлена АБС с гидравлическим и пневмоприводом, соответственно.

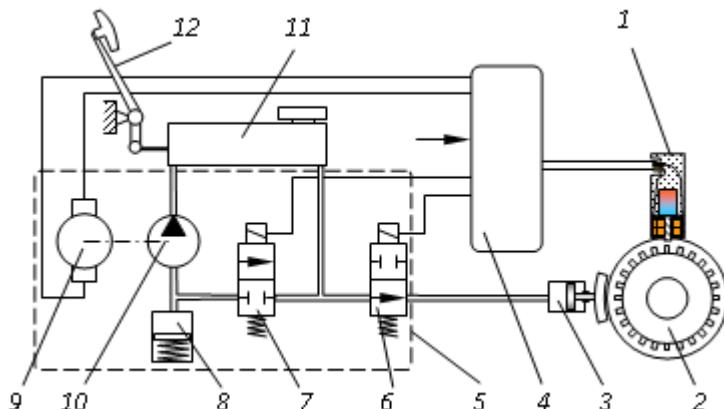


Рис.18.10. Схема АБС с гидравлическим приводом

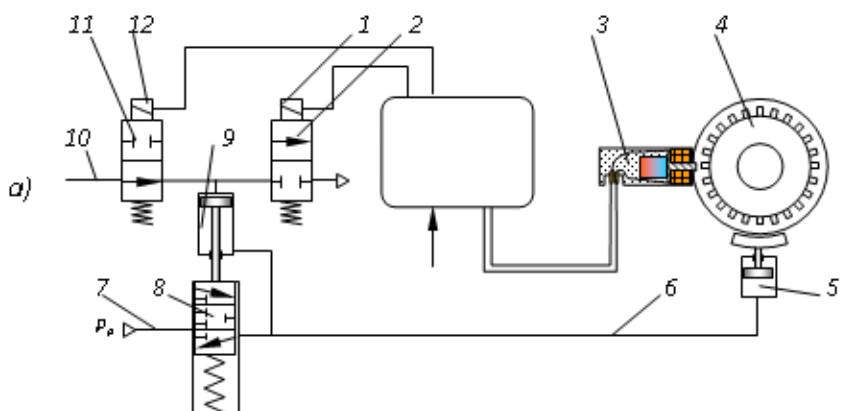


Рис. 18.11. Схема АБС с пневмоприводом:  
1 – преобразователь частоты вращения колеса; 2 – зубчатый диск колеса; 3 – рабочий гидроцилиндр; 4 – блок управления; 5 – модулятор; 6 – впускной электромагнитный клапан

**пан; 7 – выпускной электромагнитный клапан; 8 – энергоаккумулятор; 9 –электромотор; 10 – гидронасос; 11 – главный цилиндр; 12 – педаль тормоза**

### **Контрольные вопросы**

1. Устройство и принцип работы ABS.
2. Перечислить датчики, которые связаны с работой ABS.
3. Покажите структурную схему работы ABS.
4. К чему приводят попытка увеличить тормозные силы на всех колесах автомобиля?
5. Чем динамические регуляторы тормозных сил отличаются от статических и какие они имеют перед ними преимущества?
6. Что является основой работы динамического регулятора с пропорциональным клапаном?
7. Почему динамический регулятор с пропорциональным клапаном эффективно работает только на легковых автомобилях?
8. Что происходит с устойчивостью и управляемостью автомобиля при резком торможении и почему?
9. Какие элементы входят в состав любой АБС?
10. Что такое «циклический режим работы АБС»?
11. Какой критерий широко используется в алгоритмах функционирования АБС?
12. Почему схема АБС с автономным регулированием торможения каждого колеса является наиболее эффективной?
13. Объясните работу двухконтурной системы АБС с пневмоприводом на всех трех фазах ее работы.
14. Чем отличается закрытая АБС от открытой?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю.А., Гамкрелидзе С.А., Иссерлин Е.Б., Черепанов В.П. Электронные приборы и устройства на их основе. –М.: Радио Софт, 2002. -656 с.
2. Ветлинский В.Н., Осипов А.В. Автоматические системы управления движением автотранспорта. –Л.: Машиностроение, 1986. -216 с.
3. Галимов Н.С. Элементы информационных систем в автомобилестроении. –Набережные Челны: КамПИ, 2005. - 273 с.
4. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. –М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. –М.: Высшая школа, 1982. -496 с.
6. Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н., Меркулов Р.В. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. –М.: ACADEMA, 2003. -464 с.
7. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. –М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. -280 с.
9. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. –М.: Машиностроение, 1978. -736 с.
10. Измерения в промышленности. Справочник. /Под ред. Профоса П. –М.: Металлургия, 1980. -648 с.
11. Карцев Е.А., Коротков В.П. Унифицированные струнные измерительные преобразователи. –М.: Машиностроение, 1982. -145 с.
12. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. – М.: ФОРУМ-ИНФА-М, 2004. -384 с.
13. Климов А.Ю. Датчик крутящего момента с бесконтактным токосъемом. //Датчики и системы. 2004. №2. С.35-36.
14. Кравцов А.В. Электрические измерения. –М.: Агропромиздат, 1988. -240 с.

15. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. –М.: Энергия, 1976. -104 с.
16. Мельников А.А. Теория автоматического управления техническими объектами автомобилей и тракторов. –М.: ACADEMA, 2003. -280 с.
17. Мельников А.А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов. –М.: ACADEMA, 2003. -276 с.
18. Попкович Г.С. Гордеев М.А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения. –М.: Высшая школа, 1986. -392 с.
19. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. –М.: Энергия, 1978. -704 с.
20. Рогов В.А., Чудаков А.Д. Средства автоматизации производственных систем машиностроения. –М.: «Высшая школа», 2005. -399с.
21. Свердин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. –Ленинград: Судостроение, 1988. -200 с.
22. Тимошенков К.Д. Минаев В.Н. Гордиенко С.Я. Приборы контроля и регулирования температуры с термобиметаллическим диском. –М.: Машиностроение, 1982. -113 с.
23. Швецов Е.К. Ревун М.П. Электрические измерения в машиностроении. –М.: Машиностроение, 1989. -168 с.
24. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. –М.: Горячая линия – Телеком. 2009. -440 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
<b>Глава 1. Теоретические основы</b>	
1.1. Информационные системы.....	5
1.2. Сигнал.....	7
1.3. Единичная функция.....	11
1.4. Элементы теории ошибок.....	14
1.5. Вычисление погрешностей.....	15
1.6. Погрешности измерительных устройств.....	15
1.7. Элементы восприятия.....	16
1.8. Классификация преобразователей.....	19
<b>Глава 2. Простейшие механические преобразователи</b>	
2.1. Рычажный преобразователь.....	22
2.2. Скребковый преобразователь.....	22
2.3. Кулакковый преобразователь.....	23
2.4. Центробежный тахометр.....	25
2.5. Гироскоп.....	28
2.6. Вибрационный гиротрон.....	30
<b>Глава 3. Электроконтактные преобразователи</b>	
3.1. Контактные преобразователи.....	36
3.2. Герконы.....	40
3.3. Ртутные герконы.....	44
<b>Глава 4. Параметрические преобразователи активного сопротивления</b>	
4.1. Резистивные преобразователи.....	46
4.2. Жидкостные преобразователи.....	52
4.3. Фоторезисторы.....	53
4.4. Магниторезисторы.....	56
4.5. Механотрон.....	57
4.6. Тензопреобразователи.....	60
4.7. Интегральные тензопреобразователи.....	63
4.8. Преобразователи крутящего момента с контакт-	

	ными кольцами.....	68
4.9.	Преобразователи крутящего момента с бесконтактным токосъемом.....	69
<b>Глава 5.</b>	<b>Параметрические преобразователи реактивного сопротивления</b>	
5.1.	Индуктивные преобразователи.....	71
5.2.	Сигнализаторы ВБ.....	75
5.3.	Магнитострикционные преобразователи.....	77
5.4.	Емкостные преобразователи.....	81
5.5.	Сенсорный преобразователь.....	86
<b>Глава 6.</b>	<b>Генераторные преобразователи</b>	
6.1.	Магнитоэлектрические преобразователи.....	87
6.2.	Преобразователь частоты вращения.....	89
6.3.	Пьезоэлектрические преобразователи.....	91
6.4.	Сельсины.....	96
6.5.	Вращающиеся трансформаторы.....	101
6.6.	Индукционный редуктосин.....	102
6.7.	Индуктосин.....	104
6.8.	Преобразователь Холла.....	105
6.9.	Тахогенераторы постоянного тока.....	109
6.10.	Синхронные тахогенераторы.....	110
6.11.	Асинхронные тахогенераторы.....	111
6.12.	Фотоэлементы с внешним фотоэффектом.....	114
6.13.	Полупроводниковые фотоэлементы.....	116
6.14.	Фототранзисторы.....	118
<b>Глава 7.</b>	<b>Дискретные преобразователи</b>	
7.1.	Дискретные электронные преобразователи.....	120
7.2.	Оптические дискретные преобразователи.....	125
7.3.	Волоконно-оптические преобразователи.....	129
7.4.	Струнные преобразователи.....	140
<b>Глава 8.</b>	<b>Преобразователи уровня</b>	
8.1.	Поплавковые преобразователи.....	149
8.2.	Поплавковый преобразователь с противовесом....	150

8.3.	Буйковый уровнемер.....	152
8.4.	Бесконтактные сигнализаторы уровня.....	153
8.5.	Радиоизотопные преобразователи уровня.....	154
<b>Глава 9.</b>	<b>Преобразователи давления</b>	
9.1.	Жидкостный манометр.....	156
9.2.	Мембранные преобразователи давления.....	157
9.3.	Сильфоны.....	161
9.4.	Трубчатые пружины.....	162
<b>Глава 10.</b>	<b>Преобразователи расхода</b>	
10.1.	Расходомеры переменного перепада давления.....	165
10.2.	Расходомеры постоянного перепада давления.....	167
10.3.	Индукционный расходомер.....	170
10.4.	Парциальный расходомер.....	172
10.5.	Счетчик с тангенциальной турбинкой.....	172
10.6.	Счетчик с аксиальной турбинкой.....	174
10.7.	Счетчик газа.....	176
10.8.	Счетчик электрической энергии.....	180
<b>Глава 11.</b>	<b>Преобразователи скорости воздушного потока</b>	
11.1.	Крыльчатый анемометр.....	186
11.2.	Чашечный анемометр.....	188
11.3.	Анемометр с воздухозаборниками.....	189
11.4.	Анемометр с доской.....	190
11.5.	Индукционный анемометр.....	191
11.6.	Пневтометрическая трубка.....	192
11.7.	Дифференциальная трубка Пито (Прандтля).....	196
11.8.	Термоанемометр.....	200
<b>Глава 12.</b>	<b>Преобразователи температуры</b>	
12.1.	Биметаллические преобразователи.....	202
12.2.	Термопары.....	209
12.3.	Пирометр.....	210
12.4.	Манометрический термометр.....	212
12.5.	Терморезисторы.....	214
12.6.	Термисторы.....	216

12.7.	Термометры жидкостные.....	219
<b>Глава 13.</b>	<b>Влагомеры</b>	
13.1.	Психрометр Ассмана.....	223
13.2.	Автоматические влагомеры.....	224
13.3.	Волосяные гигрометры.....	225
13.4.	Биморфные гигрометры.....	226
<b>Глава 14.</b>	<b>Преобразователи состава вещества</b>	
14.1.	Преобразователь растворенного кислорода.....	227
14.2.	Кислородный преобразователь (лямбда – зонд)....	228
<b>Глава 15.</b>	<b>Информационные устройства времени</b>	
15.1.	Электромагнитные реле времени.....	230
15.2.	Конденсаторные реле времени.....	232
15.3.	Пневматические реле времени.....	234
15.4.	Моторное реле времени.....	235
15.5.	Реле времени с часовым механизмом.....	236
<b>Глава 16.</b>	<b>Электрические мосты</b>	
16.1.	Одинарный мост постоянного тока.....	238
16.2.	Двойной мост постоянного тока.....	239
16.3.	Мост переменного тока.....	241
16.4.	Автоматические мосты.....	243
<b>Глава 17.</b>	<b>Алгебра логики</b>	
17.1.	Аксиомы, законы, тождества и теоремы.....	245
17.2.	Минимизация функции.....	249
17.3.	Логический элемент ИЛИ.....	255
17.4.	Логический элемент И.....	256
17.5.	Логический элемент НЕ.....	257
17.6.	Логический элемент ИЛИ-НЕ.....	259
17.7.	Логический элемент И-НЕ.....	260
17.8.	Триггеры.....	261
<b>Глава 18.</b>	<b>Принципы регулирования и управления</b>	
18.1.	Принцип работы регулятора напряжения.....	268

18.2.	Датчики электронных систем управления двигателям.....	274
18.2.1..	Измерители расхода воздуха.....	274
18.2.2.	Датчики положения и перемещения.....	277
18.2.3.	Датчики барометрического давления.....	279
18.3.	Датчики вспомогательного электрооборудования.....	283
18.3.1.	Датчик АБС магнитоэлектрического типа.....	283
	Список литературы	289
	Оглавление.....	291

**Учебное издание**

*Наиль Салихович Галимов*

*Владимир Иванович Ильин*

*Ленар Рафисович Саримов*

**ЭЛЕМЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ**

**Учебное пособие**

Главный редактор *Д.К. Мухамадеева*

Компьютерный набор и верстка *Н.С. Галимов*

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре  
Набережночелнинского института  
Казанского (Приволжского) федерального университета

Подписано в печать 14.03. 2017г.

Формат 60x84/16. Печать ризографическая.

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. п. л. 17,2. Уч.-изд. л. 17,2.

Тираж 200 экз. Заказ № 817.