

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Калининградский государственный технический университет»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

**К.А. Новоселов**

**ЭЛЕМЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА  
СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие  
для курсантов специальности 26.05.07  
«Эксплуатация электрооборудования  
и автоматики судов»

Калининград  
Издательство БГАРФ  
2020

УДК 629.5.06

**Новоселов, К.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики:** учеб. пособие / К.А. Новоселов. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020. – 257 с.

Данное пособие по содержанию соответствует федеральному государственному образовательному стандарту специальности 26.05.07 «Эксплуатация электрооборудования и автоматики судов». Учебное пособие содержит основные сведения об элементах и функциональных устройствах судовой автоматики. Рассмотрены принципы работы датчиков, усилителей и исполнительных устройств. Приведены основные характеристики элементов судовой автоматики; рассмотрены вопросы согласования элементов системы. Пособие содержит всеобъемлющее описание конструкций элементов автоматики с их важнейшими характеристиками, необходимое для выбора, настройки и обслуживания систем различного назначения на судах торгового и рыбного флотов.

Пособие может быть полезно курсантам и студентам иных специальностей при изучении устройств автоматики.

Рис. 135, табл. 2, библи. – 13 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

**Рецензенты:** *Русаков С.М.*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой ЭАС;  
*Силина С.Н.*, д-р пед. наук, профессор, ФГАОУ ВО «НИУ ВШЭ».

ISBN 978-5-7481-0443-2

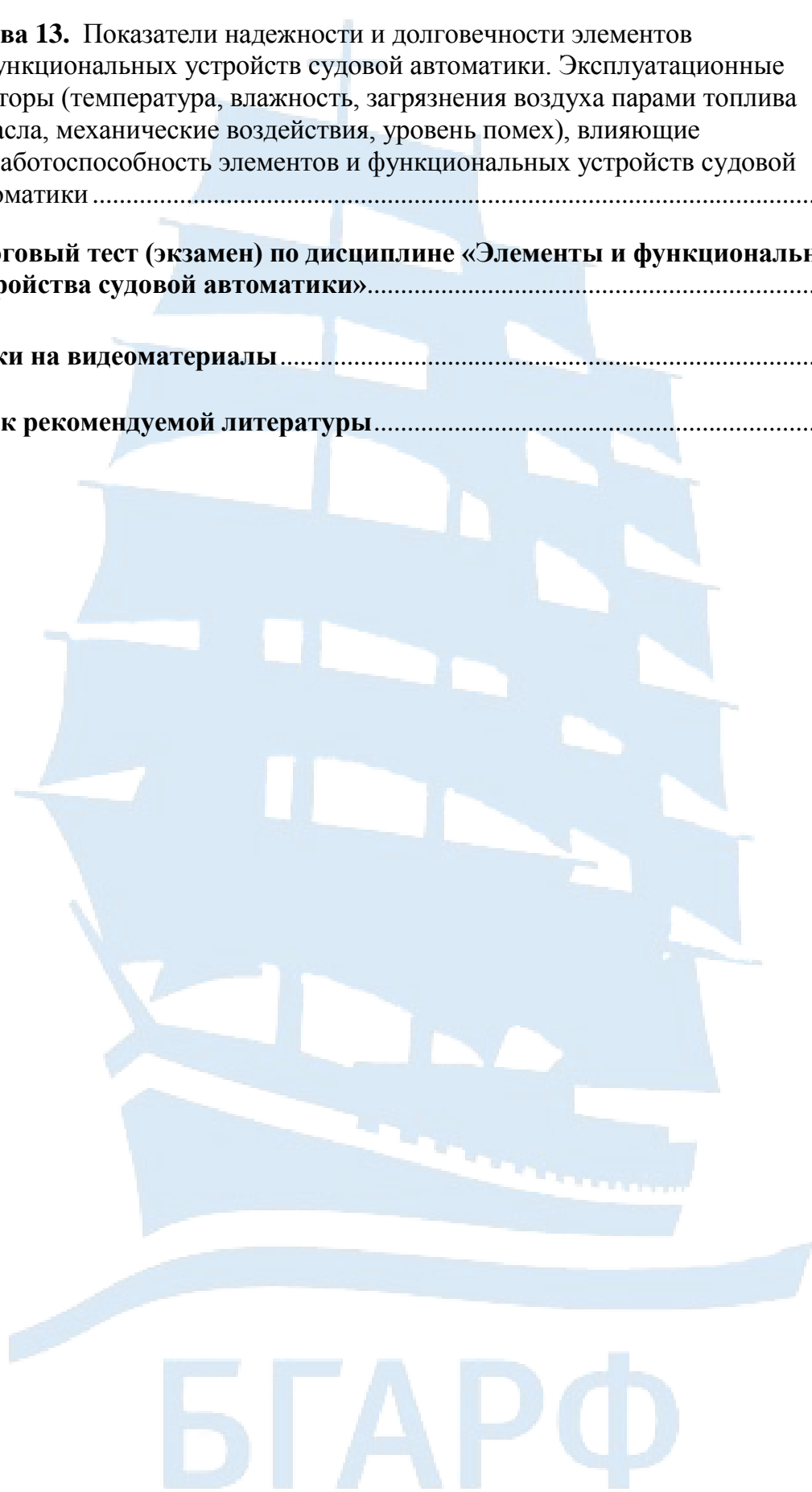
БГАРФ

© БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>Глава 1.</b> Введение. Цели и задачи дисциплины. Основные понятия и определения. Классификация и характеристики элементов и функциональных устройств судовой автоматики. ....	7
<b>Глава 2.</b> Классификация измерительных преобразователей по методу обработки сигнала и принципу действия чувствительного элемента. Структурные схемы измерительных преобразователей. ....	19
<b>Глава 3.</b> Назначение, классификация и характеристики информационных электрических машин. ....	35
<b>Глава 4.</b> Виды и характеристики измерительных преобразователей и датчиков электрических величин. Принципы построения и особенности реализации .....	50
<b>Глава 5.</b> Назначение, классификация и характеристики измерительных преобразователей и датчиков систем измерения и контроля содержания газов и химического состава жидкостей, систем обнаружения пожара, пламени, дыма и детекторов масла. ....	69
<b>Глава 6.</b> Назначение, классификация, принципы построения и характеристики элементов и функциональных узлов преобразования информации судовой автоматики. ....	84
<b>Глава 7.</b> Назначение, классификация и характеристики усилительных элементов и устройств. Принципы построения и особенности структуры .....	94
<b>Глава 8.</b> Виды, назначение и классификация реле и устройств контакторного управления и защиты. Принцип действия и характеристики ....	112
<b>Глава 9.</b> Схемы включения реле. Поляризованные электромагнитные реле. Контакты реле, средства искро- и дугогашения. Особенности конструкции реле времени и тепловых реле. ....	131
<b>Глава 10.</b> Назначение, классификация и характеристики исполнительных элементов и устройств .....	148
<b>Глава 11.</b> Исполнительные двигатели постоянного и переменного тока: разновидности, характеристики и особенности управления. ....	159
<b>Глава 12.</b> Шаговые исполнительные двигатели: назначение, разновидности, характеристики и особенности управления. ....	199

<b>Глава 13. Показатели надежности и долговечности элементов и функциональных устройств судовой автоматики. Эксплуатационные факторы (температура, влажность, загрязнения воздуха парами топлива и масла, механические воздействия, уровень помех), влияющие на работоспособность элементов и функциональных устройств судовой автоматики .....</b>	<b>215</b>
<b>Итоговый тест (экзамен) по дисциплине «Элементы и функциональные устройства судовой автоматики».....</b>	<b>225</b>
<b>Ссылки на видеоматериалы.....</b>	<b>234</b>
<b>Список рекомендуемой литературы.....</b>	<b>257</b>



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачей автоматических устройств является получение, передача, преобразование, обработка, хранение и сравнение информации; формирование новой информации; использование информации для воздействия на управляемый процесс.

Информацию выражают в виде сигналов. Под сигналом подразумевают условное изменение вещественного (длина, цвет, форма и т. д.) или энергетического параметра (тока, напряжения, давления и т. п.), однозначно связанное с воспринимаемой или передаваемой информацией. В автоматических устройствах в качестве сигналов используют энергетические параметры, так как их легко генерировать, формировать, преобразовывать.

В качестве сигналов применяются следующие параметры:

1. При использовании электрической энергии – величина постоянного тока и напряжения; амплитуда, длительность импульсов, промежуток между импульсами, частота, число или код из импульсов постоянного тока; амплитуда напряжения, амплитуда тока, частота или фаза переменного тока; амплитуда, длительность, промежуток между импульсами и частота импульсов, число импульсов или код из импульсов переменного тока.

2. При использовании энергии сжатого воздуха (пневматической) или газа – величина давления; величина потока воздуха (газа).

3. При использовании энергии жидкости под давлением – величина давления; величина потока рабочей жидкости.

4. При использовании механической энергии – величина усилия (момента), величина перемещения (линейного или углового), величина скорости (угловой).

В процессе работы автоматических устройств с сигналами приходится производить следующие основные операции:

- получение сигнала, однозначно связанного с информацией о контролируемом параметре;
- преобразование сигнала по роду энергии;
- преобразование сигнала по виду (например, непрерывного в импульсный и т. д.);
- преобразование сигнала по величине (усиление);
- преобразование сигнала по функциональной зависимости (между входным и выходным сигналами);
- сравнение сигналов;
- логические операции с сигналами;
- распределение сигналов по различным путям;
- хранение сигналов;
- использование сигналов для воздействия на управляемый процесс.

Простейшие автоматические устройства, предназначенные для выполнения одной из указанных основных операций, называются элементами. В ряде случаев элементы строятся так, что одновременно выполняют две и более операции с сигналами. Из элементов совместно с источниками питания и другими вспомогательными частями образуются основные функциональные автоматические устройства. Функциональные автоматические устройства в необходимых сочетаниях образуют системы автоматического контроля, регулирования и управления.



## **ГЛАВА 1. Введение. Цели и задачи дисциплины. Основные понятия и определения. Классификация и характеристики элементов и функциональных устройств судовой автоматики**

В соответствии с требованиями ФГОС ВО, Международной конвенции ПДНВ-78 и модельных курсов ИМО цель освоения дисциплины состоит в изучении принципов построения и функционирования датчиков и измерительных преобразователей, непрерывных и дискретных элементов и функциональных узлов преобразования информации, усилителей мощности и исполнительных устройств, особенностей их технического обслуживания и ремонта, выбора для эквивалентной замены в процессе эксплуатации судового оборудования; в формировании способности и готовности устанавливать причины отказов средств автоматики, определять и осуществлять мероприятия по их предотвращению, в формировании навыков чтения электрических и простых электронных схем.

Для достижения цели ставятся задачи:

- изучение принципа действия и устройства термоэлектрических, пьезоэлектрических, электромагнитных, потенциометрических, терморезисторных и других датчиков и преобразователей, информационных электрических микромашин, анализаторов жидкостей и газов;
- изучение принципов построения и функционирования масштабирующих, суммирующих, интегрирующих и других устройств непрерывного действия для реализации математических операций, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, компараторов, генераторов, контактных и бесконтактных логических элементов, цифровых функциональных устройств;
- изучение принципов построения и функционирования электрических и электронных усилителей, пневматических, гидравлических и комбинированных усилителей, электромагнитных, электродвигательных, пневматических и гидравлических исполнительных устройств;
- изучение общих требований к техническому использованию, техническому обслуживанию и ремонту элементов и функциональных устройств судовой автоматики в соответствии с требованиями международных и национальных нормативно-технических документов;
- анализ конструкции, технических характеристик и особенностей работы элементов и функциональных устройств судовой автоматики при выборе их для эквивалентной замены в процессе эксплуатации судового оборудования;
- изучение основных причин отказов элементов и функциональных устройств судовой автоматики и мероприятий по их предотвращению;
- изучение условных графических обозначений функциональных элементов и устройств судовой автоматики на электрических схемах.

### *Основные понятия и определения:*

- автоматическое регулирование – поддержание постоянного или изменяющегося по заданному закону заданной величины, которая характеризует производственный процесс путем измерения состояния объекта или действующих на него величин и воздействия на регулирующий орган объекта;
- автоматическое управление – автоматическое осуществление совокупных воздействий, выбранных из множества возможных на основании определенных и направленных на поддержание функционирования объектов в соответствии;
- управление объектом – техническое устройство (совокупность устройств) осуществляющий технический процесс, который нуждается в оказании специальных организационных воздействий извне на исполнительный орган для выполнения его алгоритмов функционирования;
- воздействие, вырабатываемое управляющим устройством или задаваемое человеком, называется – управляющим;
- воздействие, независимое от системы управления, называется возмущением;
- возмущения могут быть двух типов: нагрузки и помехи.

### *Определение элемента и основные характеристики*

Простейшие автоматические устройства, предназначенные для выполнения одной из указанных основных операций, называются элементами. В ряде случаев элементы строятся так, что одновременно выполняют две и более операции с сигналами. Из элементов совместно с источниками питания и другими вспомогательными частями образуются основные функциональные автоматические устройства. Функциональные автоматические устройства в необходимых сочетаниях образуют системы автоматического контроля, регулирования и управления.

Элементом автоматики называется простейшая конструктивная целостная ячейка системы, предназначена для одной из следящих операций сигнала:

- преобразование контролируемой величины в сигнал, удобный для дальнейшей обработки и передачи (измерительные преобразователи и датчики);
- преобразование сигнала одного рода энергии в сигнал другого рода энергии;
- преобразование сигнала по значению энергии (усилители);
- преобразование непрерывного сигнала в дискретный и наоборот (цифро-аналоговый преобразователь – ЦАП, аналого-цифровой преобразователь – АЦП);



- преобразование сигнала переменного тока в постоянный и наоборот;
- выполнение логических операций (логические элементы);

Статической характеристикой называется зависимость между выходными и входными величинами.

Статическая характеристика называется линейной, если она описывается линейным уравнением и его график имеет форму прямой линии. Элемент с такой характеристикой называется *линейным*.

Дифференциальный коэффициент преобразования называется *пределом отношений*.

$$K_{\text{диф}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

В общем случае дифференциальный коэффициент преобразования имеет переменное значение и только для элемента с линейной статической характеристикой  $K_{\text{диф}} = \text{const}$ .

В усилителях дифференциальный коэффициент преобразования называется коэффициентом усиления, а в измерительных преобразователях и датчиках – чувствительностью.

Отношение конечного измерения выходной величины к соответствующему изменению входной величины называется статическим коэффициентом преобразования (передачи).

$$K_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{max}} - Y_0}{X_{\text{max}}},$$

где  $Y_0$  – параметр Х.Х.

### ***Динамические характеристики элемента***

В реальных условиях на элементы автоматики оказывают непрерывно меняющиеся воздействия, поэтому основным режимом работы любого элемента является неустановившийся режим, который называется также переходным или динамическим.

Динамические характеристики элемента связывают выходную и входную величину в переходном режиме.

Поведение элемента в динамических режимах зависит от характера изменения во времени внешнего воздействия (входной величины).

Для определения динамических характеристик элемента и сравнения их друг с другом используют типовые законы изменения внешних воздействий:

- единичное ступенчатое воздействие, которое мгновенно возрастает от 0 до 1 и далее остается неизменной.

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

– Воздействие, описываемое единичной импульсной функцией  $\delta(t)$ . Функция  $\delta(t)$  представляет собой импульс бесконечно большой амплитуды и бесконечно малой длительности, площадь которой = 1.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases},$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

– Воздействие, описываемое гармонической функцией:

$$x = x_{max} \sin(\omega t + \varphi).$$

Передаточная функция элемента равна отношению изображений по Лапласу выходной и входной величин элемента при нулевых начальных условиях

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)};$$

$$Y(P) = W(P) \times X(P).$$

Если на вход линейного элемента подать гармоническое возмущение, то в установившемся режиме выходная величина будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой, которую имеет входная величина, но с другой амплитудой и фазой.

Амплитуда и фаза выходного сигнала зависит от частоты возмущенного воздействия. По их изменениям можно судить о динамических свойствах элемента.

Отклонение  $A(\omega) = \frac{y_{max}}{x_{max}}$  называется АЧХ.

Разность  $\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)$  называется ФЧХ.

$$x = x_{max} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$y = y_{max} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Если в выражение для передаточной функции  $P = j\omega$ , то получается частотная передаточная функция  $W(j\omega)$ .

Кривая, описываемая концом вектора  $W(j\omega)$  на комплексной плоскости при изменении  $\omega$ , называется амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ).

Частотная характеристика элемента зависит только от его свойств, но не зависит от амплитуды и фазы входной величины.

## **Типовые динамические звенья**

Динамическим звеном называется искусственно выделяемая часть автоматической системы, описываемая уравнением определенного вида.

Независимо от физической природы, принципа действия, назначения устройства, динамические звенья различаются динамическими характеристиками, которые определяются видом уравнения, описывающего работу звена.

В отличие от элементов автоматики динамическое звено не обязательно является конструктивно-целостным устройством.

Наиболее часто в качестве динамического звена рассматривается отдельная часть элемента автоматики. В некоторых случаях одним динамическим звеном могут быть представлено несколько элементов системы.

Типовые динамические звенья описываются дифференциальными уравнениями не выше второго порядка.

### **I. Позиционные звенья**

#### **1. Безинерционные (пропорциональное звено)**

Такое звено в установившемся и в переходном режиме описывается алгебраическим уравнением

$$Y = k \times x.$$

Передаточная функция звена равна постоянному значению

$$W(P) = k.$$

Делитель напряжения

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

#### **2. Апериодическое звено первого порядка (рис. 1)**

$$U_{\text{ВЫХ}} = kU_{\text{ВХ}};$$

$$I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 + R_2} = U_{\text{ВХ}} = R_2 I;$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{\text{ВХ}}.$$

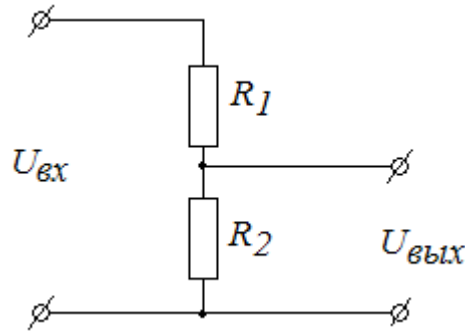


Рис. 1. Аперидическое звено

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx.$$

Передаточная функция:

$$W(P) = \frac{k}{(TP + 1)} = \frac{y(P)}{x(P)}.$$

### 3. Колебательное звено

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + Z\xi T \frac{dy}{dt} + y = kx,$$

где  $T$  – постоянная времени;

$\xi$  – относительный коэффициент затухания;

$k$  – коэффициент затухания.

$$P_{1,2} = -\beta \mp j\omega k = -\frac{\xi}{T} \mp j \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}.$$

где величина  $\beta$  – характеризует степень затухания колебаний, а  $\omega k$  – угловую частоту колебаний.

$$(T^2 P^2 + 2\xi TP + 1) \times y(P) = kx(P);$$

$$W(P) = \frac{k}{(T^2 P^2 + 2\xi TP + 1)}.$$

### 4. Аперидическое звено второго порядка

Если звено описывается дифференциальным уравнением вида (1), но относительное затухание  $\xi > 1$ , то характеристическое уравнение имеет не

комплексные, а отрицательные вещественные корни. Характеристики звеньев представлены на рис. 2.

$$P_{1,2} = \frac{1}{T(\xi \mp \sqrt{\xi^2 - 1})}$$

Поэтому такое звено уже не является колебательным.

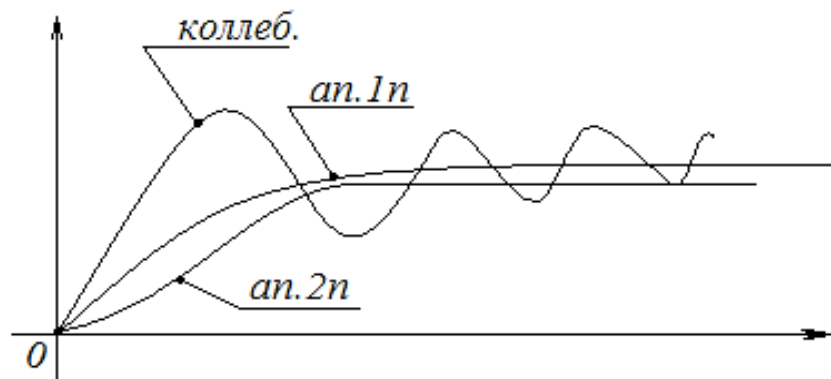


Рис. 2. Характеристики звеньев

## II. Интегрирующие звенья

### 1. Идеальное интегрирующее звено

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dy}{dt} = kx;$$

или

$$y = k \int x dt.$$

Выходная величина пропорциональна интегралу от входной величины. Это звено называется *астатическим*.

$$W(P) = \frac{k}{p},$$

где  $W(P) = \frac{k}{p}$  – передаточная функция звена.

В качестве примера интегрирующего звена рассмотрим интегрирующий усилитель, так как операторное уравнение «С»  $z_c(P) = 1/C_P$  (рис. 3).

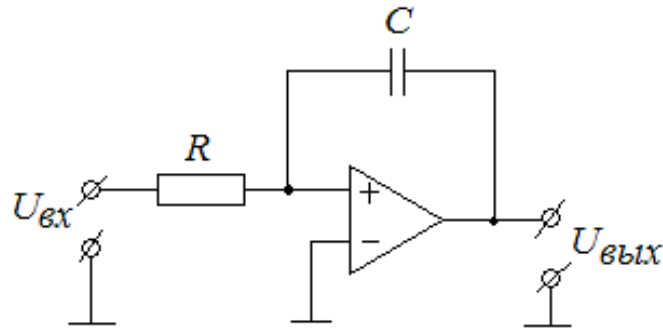


Рис. 3. Интегрирующее звено

$$U_{\text{ВЫХ}}(P) = -\frac{1}{RCP} \times U_{\text{ВХ}}(P) = -\frac{k}{P} U_{\text{ВХ}}(P).$$

## 2. Реальное интегрирующее звено

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$T \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = kx;$$

$$P(TR + 1) \times y(P) = kx(P);$$

$$W(P) = k/P(TP + 1).$$

Реальное интегрирующее звено можно представить как совокупность двух включенных последовательных звеньев идеального интегрирующего и апериодического первого порядка.

## III. Дифференцирующие звенья

### 1. Идеальное дифференцирующее звено

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$y = k \frac{dx}{dt};$$

$$y(P) = k \times P \times x(P);$$

$$W(P) = kP;$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RCP \times U_{\text{ВХ}} = -kPU_{\text{ВХ}}.$$

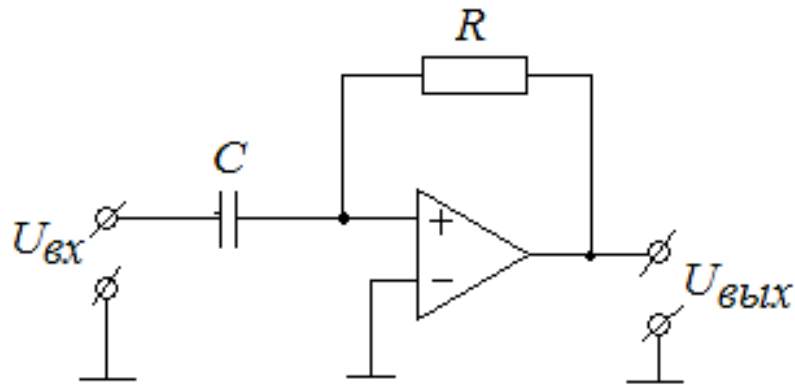


Рис. 4. Дифференцирующее звено

К идеальным дифференциальным звеньям (рис. 4) относят: тахогенератор, работающий в режиме холостого хода.

## 2. Реальное дифференцирующее звено

$$T \frac{dy}{dx} + y = kx \frac{dx}{dt};$$

$$W(P) = kP / P(TP + 1).$$

Реальное дифференцирующее звено (рис. 5), как и реально интегрирующее звено, можно представить в виде последовательного соединения двух звеньев идеально дифференцирующего и апериодического звена первого порядка.

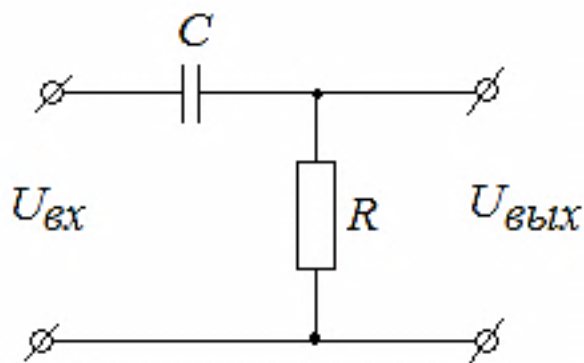


Рис. 5. Реальное дифференцирующее звено

## Элементы функциональных устройств судовой автоматики

Функциональная схема системы управления и назначение ее элементов (рис. 6).

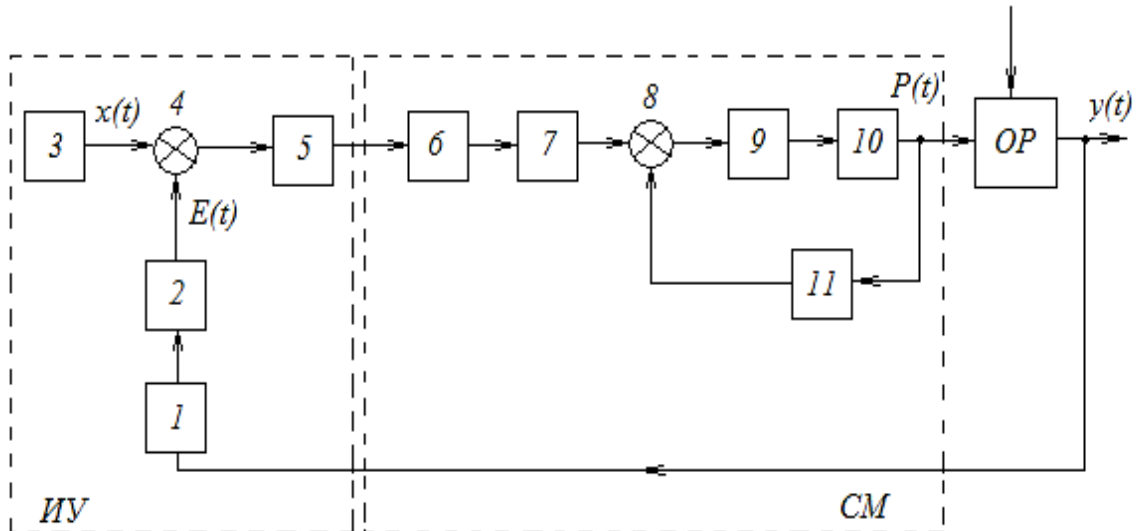


Рис. 6. Функциональная схема системы управления

Схема состоит из объекта регулирования (ОР) и устройств, которые по назначению классифицируются следующим образом:

1 – чувствительный элемент (воспринимает измерение управляющей величины  $y(t)$ );

2 – чувствительный элемент (придает управляющей величине форму удобную для сравнения с задающим сигналом  $x(t)$ );

3 – задающее устройство;

4 – СУ (формирует на основании сравнения задающего сигнала и управляющей величины управляющий сигнал (сигнал ошибки  $E(t)$ ));

5 – преобразующее устройство (трансформирует сигнал ошибки в форму, удобную для ее последующего использования);

6 – последовательное корректирующее устройство, придающее системе требуемые динамические свойства;

7, 9 – усилительные устройства;

8 – вспомогательное устройство (сравнивает сигнал в промежуточной точке прямой цепи сигнализации местной обратной связи (позиционирование));

10 – исполнительное устройство (вырабатывающее воздействие  $r(t)$ );

11 – корректируемая ОС, придающая системе требуемые динамические свойства  $P(t)$ .

Приведенная функциональная схема является одной из возможных типовых схем, соединения перечисленных выше устройств. Каждое из этих



устройств может представлять собой сложную систему, состоящую из многих элементов.

Всё множество САР в этом случае можно представить, как несколько типовых САР с типовыми функциональными схемами.

Основными из этих типов являются следующие:

- системы с параллельным корректирующим устройством (КУ);
- системы с последовательным КУ;
- комбинированные системы, содержащие параллельные и последовательные КУ;
- каскадные системы.

САР с параллельным КУ (рис. 7).

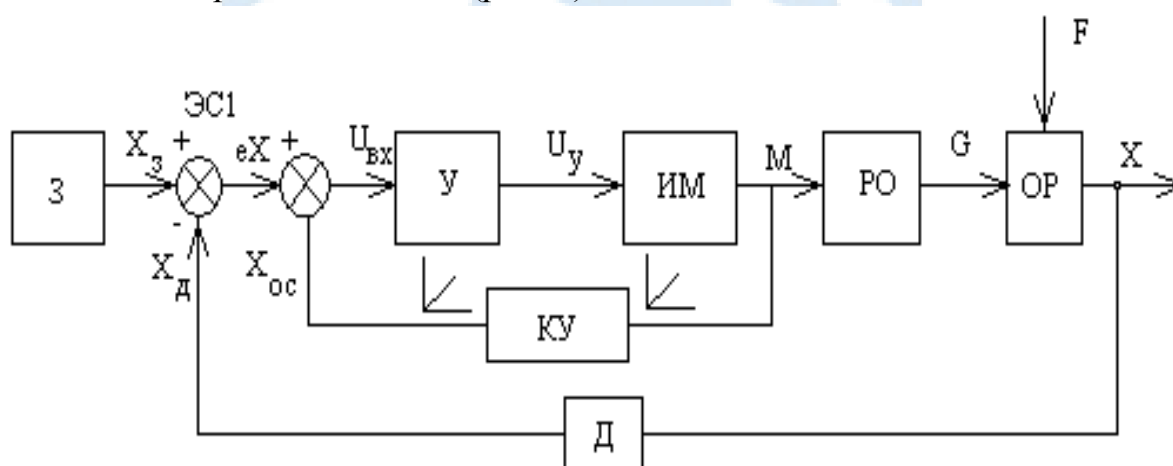


Рис. 7. САР с параллельным КУ

З – задатчик, формирующий сигнал с заданного значения регулируемой величины  $X_3$ ;

Д – датчик, выходной, сигнал которого соответствует действительному значению регулируемой величины;

ЭС1 – элемент сравнения, формирующий сигнал  $eX$ , равный  $X_3 - X_д$ , отклонения регулируемой величины от заданного значения;

$eX$  – ошибка регулирования;

У – усилитель, который повышает мощность входного сигнала  $U_{вх}$  до уровня необходимого для перемещения регулируемого органа с требуемой скоростью;

ИМ – исполнительный механизм, преобразующий выходной сигнал усилителя  $U_y$  в механическое перемещение  $M$  (сервомотор, актуатор);

РО – регулируемый орган, жестко связанный с ИМ и оказывающий непосредственное регулирующее воздействие на объект  $G$ ;

КУ – параллельное корректирующее устройство, предназначено для обеспечения качества работы САР. Как правило, КУ представляют собой

обратные связи регулятора. Выходной сигнал КУ ( $X_{ос}$ ) вычитается из сигнала отклонения  $eX$  в элементе сравнения ЭС2.

Таким образом,

$U_{вх} = eX - X_{ос}$  – входной сигнал усилителя.

Это означает, что обратная связь является отрицательной.

### **Промежуточное тестирование**

1. Что такое типовое динамическое звено? Типы звеньев.
2. Напишите передаточные функции для пропорционального звена, апериодического звена 1-го порядка, колебательного звена, идеального и реального интегрирующего звена, идеального и реального дифференцирующего звена.
3. Типы САР.



**БГАРФ**

## ГЛАВА 2. Классификация измерительных преобразователей по методу обработки сигнала и принципу действия чувствительного элемента. Структурные схемы измерительных преобразователей

Понятия «**измерительный преобразователь**» и «**преобразовательный элемент**», а также некоторые признаки их классификации приведены. Для категорий средств измерения (СИ), охватывающих измерительные приборы и измерительные преобразователи, допускается применять термин *измерительное устройство (ИУ)*.

**Измерительный преобразователь** – для преобразования одной физической величины в другую, функционально с ней связанную.

**Датчиком** называется совокупность ряда измерительных преобразователей, размещающихся непосредственно у объекта управления и служащие для преобразования измерительной величины в выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки, дистанционной передачи.

Существует довольно большое разнообразие классификаций измерительных устройств. Но независимо от классификации характерной чертой, присущей им всем, является обязательное наличие в измерительной **цепи первичного измерительного преобразователя** – ИП, к которому подведена измеряемая величина, т. е. первого в измерительной цепи. Именно первичные ИП служат главным связующим звеном между измеряемой физической величиной и конечным результатом измерения – получением измерительной информации о ней.

Чувствительным органом первичного ИП является **чувствительный элемент** – часть первого в измерительной цепи преобразовательного элемента, на который непосредственно воздействует (подается) измеряемая величина.

Наряду с термином «**первичный ИП**» широкое распространение в приборостроении и технике получил термин «**датчик**». **Датчиком** называют отдельное, конструктивно завершенное ИУ, размещаемое в процессе измерения непосредственно в зоне объекта измерений (исследований) и выполняющее функции измерительного преобразователя.

Для последующего преобразования выходного сигнала первичного ИП к виду, удобному, например, для восприятия, передачи или обработки, в измерительной цепи за первичным ИП располагается **промежуточный измерительный преобразователь**. ИП, следующие за первичным, также называют *вторичными*.

### *Классификация измерительных преобразователей*

Ввиду существования множества разнообразных по принципу действия и назначению ИП для измерения или преобразования сигналов возникает необходимость систематизации ИП.

Систематизация предусматривает объединение ИП в группы или виды по некоторым классификационным признакам и преследует цели облегчения и обобщения вопросов изучения, исследования ИП, а также их проектирования, изготовления и эксплуатации. При этом классификационные признаки могут быть самыми разнообразными и даже противоречивыми. Так, для потребителя наиболее естественной является систематизация ИП по видам измеряемых входных величин, например, давлению, температуре, скорости и т. п. Поиск необходимого преобразователя будет заключаться в выборе ИП, удовлетворяющего заданному диапазону измерений, точностным, стоимостным, габаритно-массовым и другим характеристикам.

Для разработчика конструкции и технологии изготовления предыдущий признак малоэффективен и даже мешает систематизации по применению типовых конструктивных решений и оборудования для их изготовления, например, механических, электронных, химических и других ИП. Следовательно, для целей конструирования классификационным признаком целесообразнее принять физический принцип действия ИП.

Для решения задач автоматизированного проектирования, связанных с математическим моделированием, первоочередным признаком могут быть виды математических моделей или виды уравнений, описывающих ИП: обыкновенные дифференциальные уравнения или уравнения в частных производных, линейные – нелинейные, аналоговые – дискретные.

Используя различные классификационные признаки, можно провести ряд классификаций, каждая из которых по-своему будет отражать свойства ИП, иметь свои преимущества и недостатки.

Основным назначением классификации, рассматриваемой в настоящем параграфе, является систематизация ИП с целью их изучения и получения описаний для решения задач проектирования – структурного синтеза, составления математической модели, параметрической оптимизации и определения, нормируемых метрологических характеристик.

В этом случае целесообразно выделить следующие классификационные признаки: место ИП в структурной схеме; вид функции преобразования; вид выходного сигнала; вид математической модели ИП; физические закономерности, положенные в основу принципа действия ИП.

**По месту в структурной схеме** измерительные преобразователи подразделяются на: **первичные** (выполняющие их функции датчики) и **промежуточные (вторичные) ИП**.

**По виду функции преобразования**, ИП разделяются на три группы: **масштабные, функциональные и операционные**.

**Масштабные** – ИП, предназначенные для изменения величины в заданное число раз без изменения ее физической природы (неравноплечий рычаг, гидравлический или электрический усилитель, делитель напряжения).

**Функциональные** – ИП, осуществляющие однозначное функциональное преобразование входной величины с изменением или без изменения ее физической природы (тангенсный и кулачковый механизмы, емкостный или индуктивный ИП давления).

**Операционные** – ИП, выполняющие математические операции высшего порядка над входной величиной (дифференцирование или интегрирование по временному параметру).

**В зависимости от характера формирования выходного сигнала** ИП делятся на *генераторные и параметрические*.

**По виду математической модели**, описывающей процессы преобразования сигнала в измерительной цепи, ИП можно подразделить на аналоговые и дискретные, линейные и нелинейные с постоянными и переменными сосредоточенными и распределенными параметрами. Каждый из этих ИП описывается одним из классов уравнений математики.

**Аналоговые линейные ИП с постоянными и сосредоточенными параметрами** описываются обыкновенными линейными и дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами (рычажные весы с пружиной, но без учета сухого трения, емкостный ИП, но без учета краевого эффекта).

**Аналоговые нелинейные ИП с постоянными и сосредоточенными параметрами** описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами (рычажные весы, емкостный ИП с учетом трения и краевого эффекта).

**Аналоговые линейные и нелинейные ИП с переменными параметрами** – ИП, в которых хотя бы один параметр, а, следовательно, и коэффициент дифференциального уравнения изменяются во времени или в зависимости от любой другой величины.

**Аналоговые линейные и нелинейные ИП с постоянными и переменными распределенными параметрами** описываются дифференциальными уравнениями в частных производных (круглая или прямоугольная защемленные мембраны с учетом изменения ее жесткости по радиусу или длине).

**Дискретные ИП** – у которых входной сигнал подвергается дискретизации во времени и (или) квантованию по уровню.

**Линейные дискретные ИП** описываются линейными разностными дифференциальными уравнениями (аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор).

**По физическим закономерностям**, положенным в основу принципа действия, измерительные преобразователи могут быть разделены на следующие группы: механические упругие; резистивные; пьезоэлектрические; емкостные; электромеханические; гальваноманометрические; электромагнитные; индукционные; тепловые; электрохимические; адсорбционные; оптоэлектронные; ионизирующего излучения; квантовые и др.

**Механические упругие ИП** используются чаще всего в качестве первичного ИП или чувствительного элемента. В основу принципа их действия положены зависимости реакции элементов в виде перемещения, скорости или деформации на входную величину (сила, момент, давление).

**Резистивные ИП** можно подразделить на два вида – **электрические и электромеханические**. В основу принципа действия *электрических* резистивных ИП положены зависимости между током, напряжением и электрическим сопротивлением. В *электромеханических* ИП используются зависимости изменения электрического сопротивления под воздействием входной механической величины (силы, давления).

**Пьезоэлектрические ИП** основаны на использовании прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов. *Прямой* пьезоэффект заключается в электрической поляризации диэлектриков при механическом воздействии на них. Обратный пьезоэффект проявляется в том, что электрическая поляризация вызывает механические напряжения в диэлектриках (кристаллах) или изменение их геометрических размеров.

**Емкостные ИП** основаны на использовании зависимостей взаимодействия двух заряженных тел. Носителем измерительной информации в них является электрический заряд.

Принцип действия *электромеханических ИП* основан на возникновении механических перемещений их подвижных элементов под действием электрического тока. К ним относятся электродинамические, ферродинамические и магнитоэлектрические измерительные преобразователи.

**Гальваномагнитные ИП** основаны на физических эффектах, заключающихся в изменении электрических параметров преобразователей под воздействием магнитного поля. Наибольшее распространение получили **ИП, основанные на эффекте Холла** (возникновение ЭДС, например, на боковых гранях пластины) и на магниторезистивном эффекте (эффект Гаусса), проявляющемся в изменении электрического сопротивления пластины.

**Электромагнитные ИП** представляют собой один или несколько контуров, находящихся в магнитном поле, и основаны на использовании электромагнитных явлений. Это большая и разнообразная по назначению группа преобразователей (индуктивные делители, измерительные трансформаторы, функциональные индуктивные преобразователи механических величин).

**Индукционные ИП** основаны на использовании закона электромагнитной индукции. При этом входной величиной может быть скорость перемещения измерительной катушки, а выходной – ЭДС индукции.

**Тепловые ИП** основаны на использовании физических закономерностей, определяемых тепловыми процессами, например, термоэлектрические с преобразованием температуры в термоЭДС, терморезистивные – температуры в изменение сопротивления, термомеханические – температуры в изменение длины и т. д. Тепловые ИП также могут быть использованы для

преобразования других физических величин, например расхода, концентрации, давления, которые функционально связаны с температурой и проявляются через тепловые процессы.

**Электрохимические ИП** в общем случае можно представить, как электролитическую ячейку и электродную систему из двух или нескольких электродов, включаемых в измерительную цепь. Как элемент электрической цепи электрохимическая ячейка может характеризоваться развиваемой ею ЭДС, падением напряжения от проходящего тока, электрическим зарядом, сопротивлением, емкостью и индуктивностью. Выбирая одну из этих величин в качестве информативного параметра и устанавливая ее зависимость с входной величиной, можно получить преобразователи для измерения давления, температуры, состава и концентрации веществ, скорости, ускорения и ряда других физических величин.

**Адсорбционные ИП** используются для измерения, например, парциальных давлений на основании измерения концентрации газов. К основным измерительным преобразованиям таких ИП относятся перенос выбранной компоненты в газовой фазе; сорбция и десорбция на поверхности чувствительного элемента; прохождение адсорбента через границу фазового раздела; поверхностная и объемная диффузия в кристаллической решетке ИП; генерация и рекомбинация зарядов и как следствие этого – изменение электрофизических свойств ИП.

**Оптоэлектронные ИП** основаны на использовании преобразований потока ультрафиолетового светового и теплового излучений. Преобразование измерительной информации в них может осуществляться самым различным образом (модуляция параметров источников измерения или оптического канала, использование мощности излучения и т. д.).

**Преобразователи ионизирующего излучения** основаны на использовании в качестве входной величины интенсивности ионизирующего и радиационного излучения.

В *квантовых ИП* наиболее часто используется явление резонансного поглощения энергии радиочастотного электромагнитного поля рабочим веществом под воздействием таких преобразуемых величин, как напряженность магнитного или электрического поля, давление, температура.

Привести в настоящем параграфе описание конструкций и принципов действия всего указанного разнообразия ИП не представляется возможным. Поэтому рассмотрим лишь некоторые, наиболее часто встречающиеся конструктивные решения ИП.

**Механические упругие преобразователи** наибольшее применение нашли в качестве первичных ИП, чувствительных элементов и датчиков. Входной величиной при этом могут быть сила, момент, давление газа или жидкости. Эти величины, воздействуя на упругий элемент, вызывают его деформацию. Деформация может восприниматься непосредственно (механические показывающие приборы) или передающим (вторичным) ИП со входной

величиной в виде перемещения (реостатные, емкостные, индуктивные и другие преобразователи), скорости этого перемещения (индукционные преобразователи), механического напряжения (деформации) в некоторой области упругого элемента (тензорезистивные преобразователи).

Конструктивное исполнение механических упругих ИП весьма разнообразно. Некоторые из них приведены на рис. 8. Для измерения сил  $F$  возможно применение: сплошных стержней или цилиндров (рис. 8, а), работающих на сжатие с выходными величинами в виде продольной  $\varepsilon$  и поперечной  $\varepsilon_y$ , деформаций; плоских пружин в виде балок (рис. 8, б) или жестких мембран (рис. 8, в) с выходной величиной перемещения  $\delta(x)$  или деформации (по длине или радиусу).

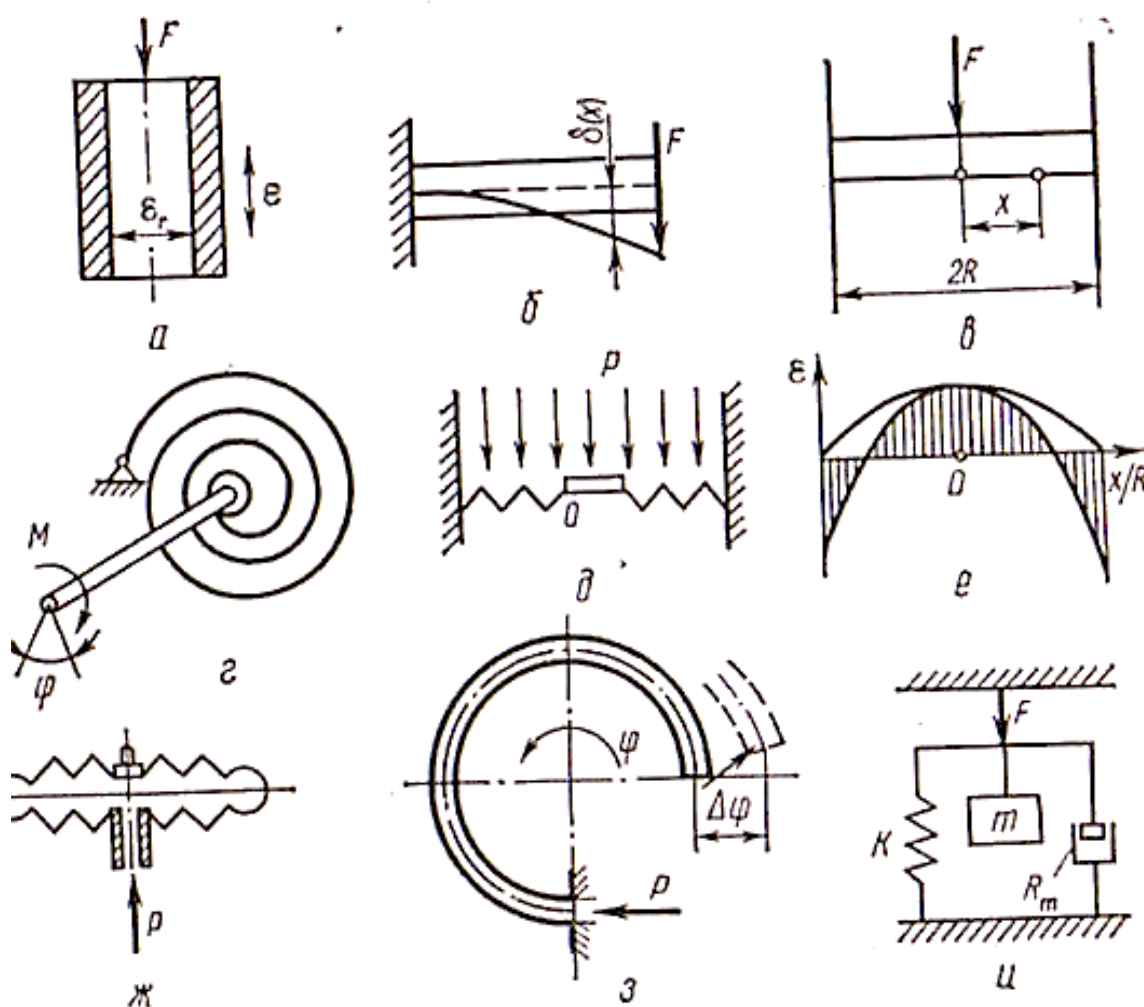


Рис. 8. Механические упругие измерительные преобразователи

Для преобразования моментов сил  $M$  в угловое перемещение  $\varphi$  могут быть использованы спиральные пружины (рис. 8, г), сплошные и полые торсионы, подвесы и растяжки.



Особое место среди механических упругих ИП принадлежит элементам для измерения давления  $P$ . Некоторые из них приведены на рис. 8,  $d$  – гофрированная мембрана; на рис. 8,  $ж$  – мембранная коробочка и на рис. 8,  $з$  – трубка Бурдона. В качестве выходных величин также могут быть использованы: перемещение центра мембраны (коробочки), угловое перемещение  $\varphi$  трубки Бурдона и деформация. Механические упругие ИП давления могут использовать как собственную жесткость, так и опираться на стержни, цилиндры, пружины и т. п.

Если рассматривать входные величины сосредоточенными или приложенными в одной точке, например, в центре мембран  $O$ , то для описания динамического режима работы механических упругих элементов можно воспользоваться обобщенной эквивалентной схемой (рис. 8,  $и$ ). Схема содержит три элемента, соединенных параллельно:  $m$  – массу подвижных частей ИП;  $k$  – коэффициент жесткости упругих элементов ИП;  $R_m$  – коэффициент успокоения, или демпфирования, учитывающий демпфирующее действие, например, воздуха в полости мембраны и подводящих трубопроводах. ИП, приводимые к такой схеме, описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями.

На рис. 8,  $е$  приведена зависимость деформации мембраны по радиусу от центра  $O$ . Как видим, при наклеивании, например, тензорезистора необходимо учитывать переменную величину прогиба и его знак в разных точках. В общем случае это приводит к тому, что параметры схемы (рис. 8,  $и$ ) нельзя принимать постоянными по всему радиусу мембраны или длине балки, а необходимо учитывать их изменение или распределенность (по длине или радиусу). Такие ИП будут описываться дифференциальными уравнениями в частных производных. И наконец, если учесть, что с увеличением прогиба коэффициент жесткости  $k$  изменяется, то в общем случае ИП будет и нелинейным.

**Резистивные преобразовательные элементы** составляют большую группу ИП, используемых в приборостроении. К основным их разновидностям можно отнести: **резистивные делители тока и напряжения; контактные; реостатные; тензорезистивные.**

**Резистивные делители, контактные и реостатные** относятся к электрическим ИП. В измерительных цепях с сосредоточенными параметрами электрическое сопротивление используется в виде самостоятельного конструктивно оформленного элемента – резистора, состоящего из изоляционного каркаса, на который нанесен чувствительный элемент в виде проволоки или тонкого слоя токопроводящего материала. Сопротивление постоянному току резистивного ИП зависит от длины  $l$ , поперечного сечения  $S$  и удельного сопротивления материала  $\rho$ :

$$R = \rho \int_0^l \frac{dl}{S}.$$

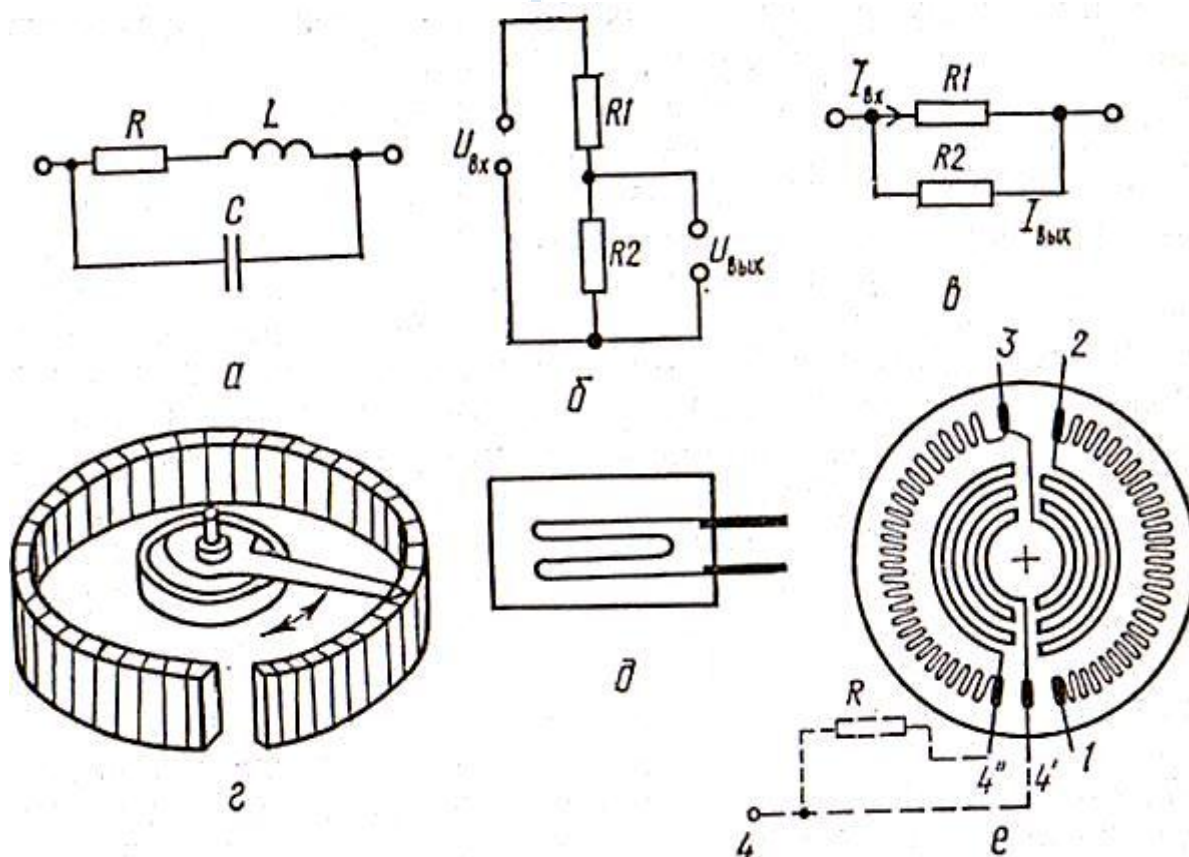


Рис. 9. Резистивные преобразователи

Если по длине сечение постоянно:  $S = \text{const}$ , то  $R = \rho l/S$ . В общем случае сопротивление не является чисто активным. При включении в измерительную цепь возможно появление реактивных составляющих – индуктивности и емкости. На рис. 9, а приведена эквивалентная схема. Индуктивность особенно велика у многовитковых проволочных резисторов.

Простейшие схемы резистивных делителей напряжения  $U_{\text{вх}}$  и тока  $I_{\text{вх}}$  приведены на рис. 9, б и 9, в. Делители применяются как непосредственно в измерительных цепях ИУ, так и в виде добавочных сопротивлений для расширения пределов измерений напряжений вольтметрами или шунтов для расширения пределов измерений по току амперметрами. Наряду с проволочными резисторами широкое применение находят углеродистые, композиционные, металлопленочные, металлооксидные и др.

**Контактными** называются ИП, у которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих, например, электрической цепью. При этом сопротивление изменяется от бесконечности (разомкнутое состояние) до минимума, определяемого контактным сопротивлением. В измерительной технике в коммутационных цепях широко используются магнитоуправляемые кон-

такты, называемые герконами (стеклянные баллончики диаметром около 3 мм и длиной около 20 мм с помещенными в них контактными пластинами).

**Реостатные** преобразователи обычно выполнены в виде реостата, движок которого перемещается под действием измеряемой величины (линейные и угловые перемещения, ускорения и статические давления). На рис. 9, *г* приведен реостатный преобразователь углового перемещения, который, в зависимости от вида намотки, может иметь как линейную, так и нелинейную характеристики.

**Тензорезистивные ИП** относятся к электромеханическим. В основу принципа действия этих преобразователей положено явление тензоэффекта, заключающее в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации. Относительное изменение сопротивления при деформации:

$$\varepsilon_R = \Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S.$$

В практике измерений тензоэффект используется в двух направлениях. Первое – изменение сопротивления тензорезистора в результате объемного сжатия; второе – использование тензоэффекта растягиваемого тензочувствительного материала. На рис. 9, *д* и 9, *е* приведены примеры пленочных тензорезисторов. На рис. 9, *е* изображен элемент, состоящий из четырех тензорезисторов, образующих четыре плеча моста. Элемент наклеивается на мембрану. В соответствии с рис. 9, *е* пара резисторов в центре будет испытывать растяжение, а на периферии – сжатие. К выводам 1 и 3 подводится питание, выводы 2, 4' и 4" образуют измерительную диагональ. К выводам 4' и 4" возможно подключение добавочного сопротивления R для установления равновесия моста.

**Пьезоэлектрические ИП.** На рис. 10, *а* представлена схема преобразователя, использующего прямой пьезоэффект. Такие ИП применяются в приборах для измерения силы, давления и ускорения. Выходной величиной является заряд  $Q_{\text{вых}}$  или ЭДС  $e_{\text{вых}}$ .

На рис. 10, *б* приведен пьезопреобразователь, использующий обратный пьезоэффект и предназначенный для перемещения зеркала оптической системы. Такие преобразователи находят широкое применение в системах активной виброзащиты элементов измерительных устройств, в качестве приводов систем управления (пьезо-двигатели), как обратные преобразователи приборов уравновешивающего преобразования и т. д.

Весьма перспективно использование пьезорезонаторов – пьезопреобразователей, когда одновременно используются прямой и обратный пьезоэффекты. Их можно применять, во-первых, в качестве фильтров, пропускающих очень узкую полосу частот, во-вторых, – как тензочувствительные и термочувствительные датчики.

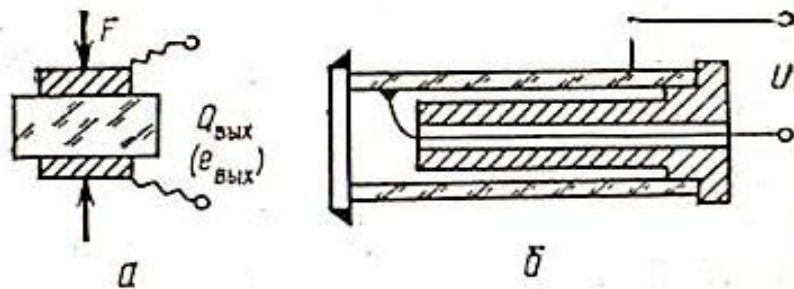


Рис. 10. Пьезоэлектрические преобразователи

**Емкостные ИП** можно разделить на две группы – генераторные и параметрические. В **генераторных емкостных ИП** входной величиной обычно является электрическое напряжение, выходной – угловое или линейное перемещение. Эквивалентная схема такого ИП приведена на рис. 11, а. Он состоит из подвижной пластины массой  $m$  и неподвижной пластины, расположенной на расстоянии  $\delta$  от подвижной. Пластины образуют конденсатор с переменным зазором, который последовательно с активным сопротивлением цепи подключен к источнику напряжения  $U$ . С механической стороны преобразователь характеризуется коэффициентом демпфирования (при движении пластины), коэффициентом жесткости подвеса подвижной пластины и ее массой. При подаче входного напряжения  $U$  возникает сила электростатического поля, вызывающая перемещение подвижной пластины, которое и является выходной величиной.

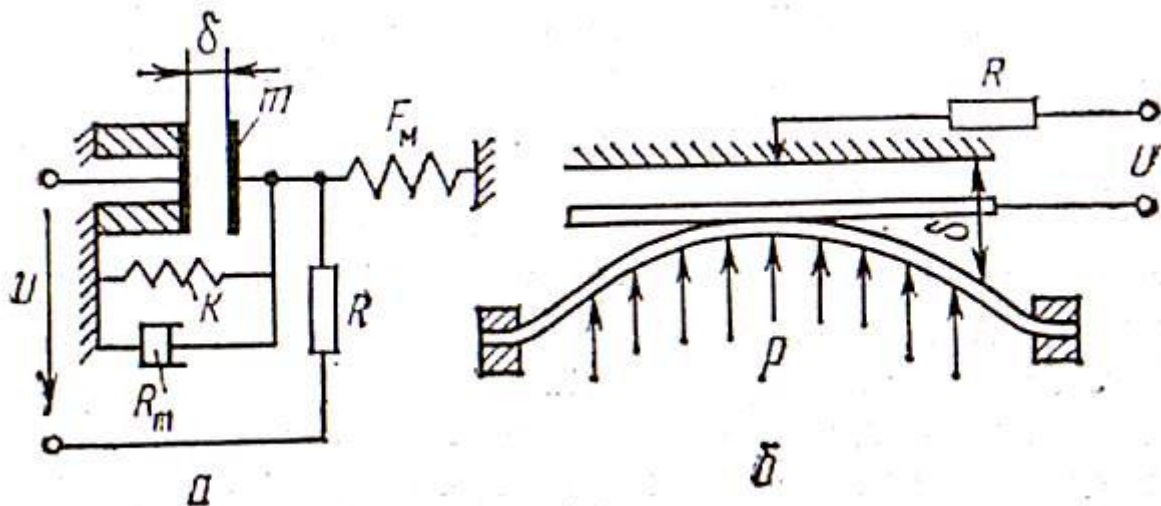


Рис. 11. Емкостные преобразователи

Для **параметрических емкостных преобразователей** входной величиной будет измеряемое механическое перемещение, действующее на подвижную пластину, а выходной – изменение емкости или падения напряже-

ния на активном сопротивлении. В сочетании с упругими преобразователями давлений, сил, ускорений и вибраций эти преобразователи являются неотъемлемой частью емкостных манометров, акселерометров, виброметров и т. д.

На рис. 11, б приведена схема чувствительного элемента емкостного ИП давления с мембраной. Давление  $p$ , действуя на мембрану, вызывает ее перемещение совместно с подвижной пластиной конденсатора. Изменение зазора  $\delta$  приводит к изменению емкости  $C$ . Это изменение и может быть выходной величиной преобразователя. В динамическом режиме этот ИП будет нелинейным в силу, во-первых, наличия краевого эффекта, во-вторых, — зависимости емкости от механического перемещения и воздействия силы электростатического поля на механическое движение, вызываемое измеряемым давлением.

**Электромагнитные ИП.** К ним в общем случае могут быть отнесены также индуктивные, индукционные и электромеханические преобразователи, так как принцип их действия основан на изменении магнитных потоков. Из всего разнообразия электромагнитных преобразователей рассмотрим принцип действия тех, которые связаны с изменением или преобразованием механических величин.

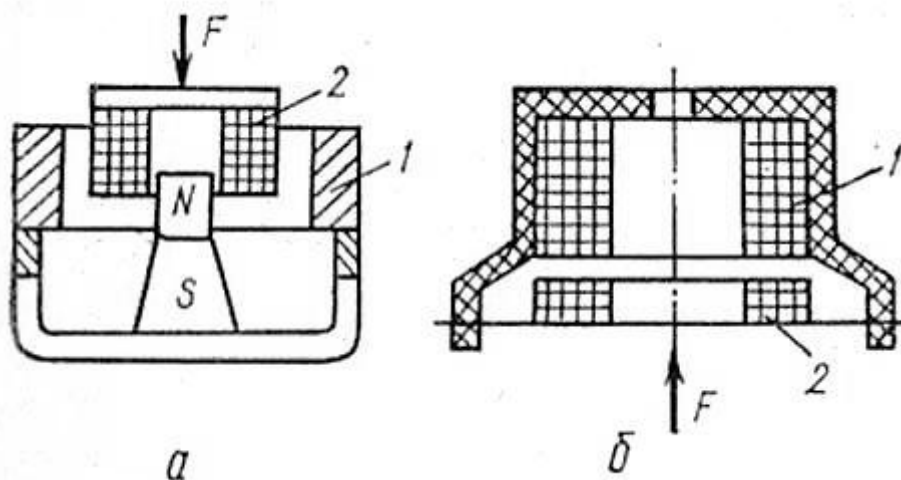


Рис. 12. Преобразователи электромеханической группы

На рис. 12 представлены преобразователи **электромеханической группы**. **Магнитоэлектрический** преобразователь (рис. 12, а) состоит из постоянного магнита NS, магнитопровода из магнитомягкой стали, представляющего П-образное основание, полюсной накладки 1, образующей с цилиндрической шейкой магнита кольцевой зазор. В этом зазоре помещена рамка 2. При протекании постоянного тока через обмотки рамки возникает усилие  $F$ . Таким образом, входной величиной ИП является ток, а выходной — сила  $F$ .

**Электродинамический ИП** (рис. 12, б) состоит из двух катушек: неподвижной 1 и подвижной 2, расположенных на одной оси на некотором расстоянии друг от друга. При протекании по катушкам тока  $I$  (входная величина) возникает усилие  $F$ , являющееся выходной величиной.

**Ферродинамические ИП** по принципу действия аналогичны электродинамическим. Однако благодаря использованию ферродинамического материала они развивают усилия в десятки раз большие, чем электродинамические. ИП электромеханической группы находят широкое применение как обратные преобразователи приборов уравнивающего преобразования, а также как измерительные механизмы для перемещения отсчетных устройств приборов прямого преобразования.

На рис. 13, а и 13, б изображены **индуктивные преобразователи с малым воздушным зазором и плунжерного типа**.

При воздействии входной величины (перемещение, давление, сила) в индуктивном ИП (рис. 13, а) изменяется воздушный зазор  $\delta$ . Это приводит к изменению сопротивления магнитной цепи и, в конечном счете, к изменению индуктивности, которое и является выходной величиной.

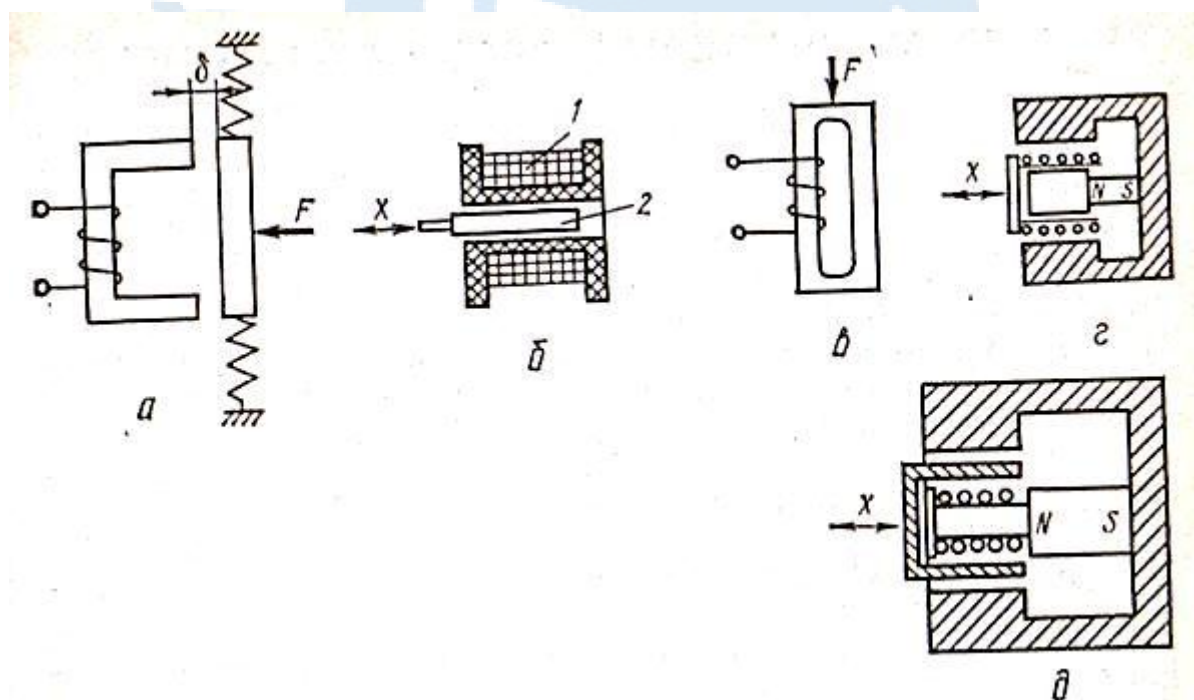


Рис. 13. Индуктивные и индукционные преобразователи

**Преобразователи плунжерного типа с разомкнутой магнитной цепью** (рис. 13, б) состоят из неподвижной катушки 1 и ферромагнитного стержня (плунжера) 2. Индуктивность катушки является функцией глубины погружения плунжера. Такие ИП применяются для преобразования перемещений 10 ... 100 мм, а в сочетании с упругими элементами – для измерения сил, давлений, ускорений. Широкое применение находят также индук-

тивные ИП – измерительные трансформаторы, делители напряжения и тока, вихретоковые, взаимоиндуктивные и другие преобразователи.

На рис. 13, в показан однообмоточный *магнитоупругий* преобразователь. Принцип действия его основан на использовании магнитоупругого эффекта, заключающегося в изменении магнитной проницаемости ферромагнитного тела в одном направлении при воздействии силы  $F$ . При этом изменяется индуктивность  $L = f(F)$ , которая и является выходной величиной. Находят применение также взаимоиндуктивные и магнитоанизотропные ИП.

На рис. 13, г приведен *индукционный* ИП скорости перемещения, у которого изменение потокосцепления является функцией изменения положения измерительной обмотки, на рис. 13, д – индукционный ИП с подвижным сердечником из ферромагнитного материала, вызывающим изменение пути магнитного потока. Выходной величиной таких преобразователей является ЭДС индукции.

### ***Структурные схемы измерительных преобразователей***

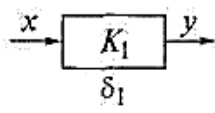
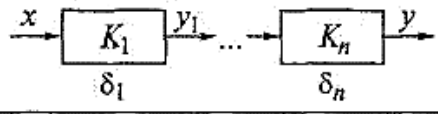
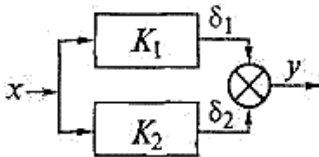
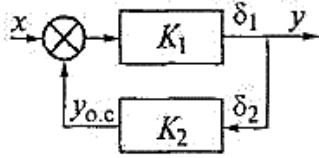
Несмотря на все многообразие ИП, их структурные схемы можно свести к нескольким типам (рис. 14).

Структурная схема *прямого однократного преобразования* реализуется во многих ИП с естественными выходными сигналами (например, в термомпарах, датчиках давления и разрежения), в которых измеряемая величина преобразуется непосредственно в электрический сигнал, перемещение или усилие. Статическая характеристика, погрешность и другие свойства здесь полностью определяются параметрами самого чувствительного элемента.

В тех случаях, когда первичное преобразование не позволяет получить удобный или требуемый для дальнейшего использования сигнал, применяют структурные схемы с несколькими *последовательными преобразованиями*, например, при необходимости получение унифицированного выходного сигнала, преобразования неэлектрической величины в электрическую, коррекции статической или динамической характеристики преобразователя. Суммарный коэффициент преобразования (общая чувствительность), равный произведению коэффициентов преобразования отдельных звеньев ИП, можно получить достаточно высоким, однако при этом увеличивается общая погрешность преобразования, равная сумме погрешностей составляющих звеньев.

В датчиках, построенных по *дифференциальной схеме*, измеряемая величина подается одновременно на два идентичных измерительных преобразователя. Выходной сигнал датчика пропорционален разности выходных сигналов ИП каждого из каналов. Если выходные сигналы имеют одинаковые знаки, то орган сравнения выполняет операцию вычитания, если знаки разные – операцию суммирования.

### Типовые структурные схемы измерительных преобразователей

Тип схемы	Статическая характеристика	Погрешность преобразования
Прямого однократного преобразования 	$y = K_1 x$	$\delta_n = \delta_1$
Последовательного прямого преобразования 	$y = \prod_{i=1}^n K_i x$	$\delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$
Дифференциальная 	$y = (K_1 - K_2)x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{K_1}{K_1 + K_2} + \delta_2 \frac{K_2}{K_1 + K_2}$
С обратной связью (компенсационная) 	$y = \frac{K_1}{1 + K_1 K_2} x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{1}{1 + K_1 K_2} - \delta_2 \frac{1}{1 + 1/(K_1 K_2)}$

*Рис. 14. Типовые структурные схемы измерительных преобразователей*

*Примечание к рис. 14.* В формулах приняты следующие обозначения:  $x$  – измеряемая величина;  $y$  – выходная величина;  $\delta_i$  – погрешность звена преобразователя;  $\delta_n$  – общая погрешность преобразователя;  $K$  – коэффициент преобразования.

Возможны варианты, когда на один из входов подается эталонный сигнал и сравнение осуществляется с ним или информация преобразуется по одному каналу в реальных условиях, а по-другому – в эталонных.

К достоинствам дифференциальных схем построения датчиков следует отнести:

- значительное уменьшение аддитивных (постоянных) составляющих общей погрешности, обусловленных воздействием возмущающих факторов;
- увеличение чувствительности вдвое при подаче входного сигнала на оба входа;



- получение реверсивной статической характеристики;
- снижение нелинейности статической характеристики и постоянных составляющих выходного сигнала по сравнению с характеристиками отдельных ИП, входящих в схему.

Наиболее совершенной схемой ИП является *схема с обратной связью*, или **компенсационная схема**. В датчиках, построенных по этой схеме, обеспечивается автоматическое уравнивание контролируемой величины компенсирующей величиной того же рода непосредственно или после предварительного преобразования. Основное достоинство такой схемы состоит в ее способности компенсировать значительные изменения параметров измерительного тракта. Кроме того, основная часть энергии, необходимой для работы датчика, берется от дополнительных источников, а не от измерительного элемента.

Преобразователи с отрицательной обратной связью (ООС) принципиально точнее, чем схемы прямого последовательного преобразования. Отрицательная обратная связь существенно снижает влияние погрешностей звеньев прямой цепи на результат преобразования. Любые ошибки и возмущение звена, не охваченного обратной связью, полностью передаются на выход преобразователя, поэтому при построении ИП целесообразно стремиться к тому, чтобы охватить обратной связью как можно больше звеньев. При величине  $K_1K_2 = 20...30$ , что нетрудно обеспечить на практике, общая погрешность преобразования практически определяется только погрешностью  $\delta_2$  обратной связи, вследствие чего требования к погрешности  $\delta_1$  прямого канала можно значительно снизить (см. рис. 14).

***Датчики с обратной связью обладают высокой чувствительностью и позволяют легко изменять параметры настройки путем изменения коэффициентов преобразования обратной цепи.***

Структурные схемы реальных ИП могут представлять собой любую комбинацию из рассмотренных выше типовых структур. В цепи последовательного преобразования измеряемого сигнала принято различать первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) и промежуточные преобразователи (рис. 15). Измеряемая величина воздействует непосредственно на первичный преобразователь. Очень часто метод первичного преобразования входной величины определяет наименование всего измерительного преобразователя или прибора. Промежуточные преобразователи могут выполнять функции усиления, линеаризации, преобразования рода сигнала и др. В частности, на рис. 15 представлена упрощенная схема ИП с естественным и унифицированным выходами.

БГАРФ

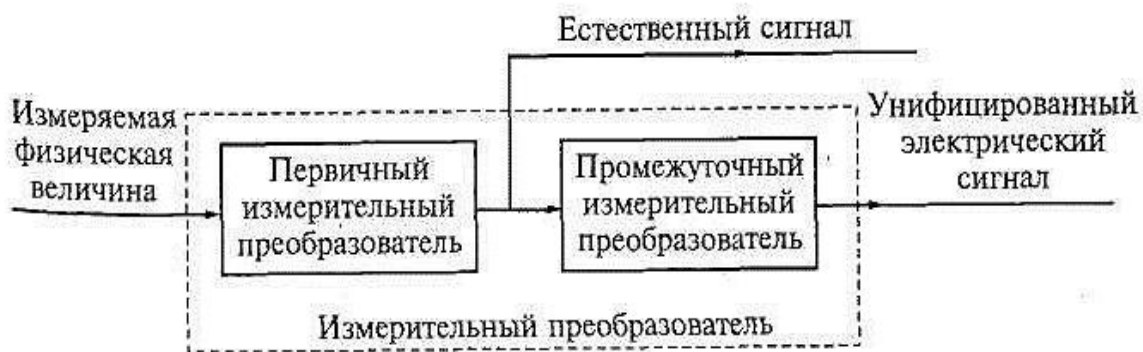


Рис. 15. Блок-схема последовательного преобразования

### Промежуточное тестирование

1. Назначение измерительного преобразователя. Что такое первичный преобразователь?
2. Виды ИП по классификационным признакам?
3. Типы структурных схем ИП. Приведите пример наиболее совершенной схемы и зарисуйте ее.

БГАРФ

### ГЛАВА 3. Назначение, классификация и характеристики информационных электрических машин

**Электрическая микромашина** (микроэлектромашина) – электрическая машина переменного или постоянного тока малой мощности (до 600-750 Вт), предназначенная для работы в системах регулирования и управления, гироскопических устройствах, бытовых приборах.

Электрические микромашины по назначению разделяются на две группы: **общего применения** (коллекторные, синхронные, асинхронные микродвигатели) и **электрические машины устройств и приборов**: силовые (преобразуют электрическую энергию в механическую); информационные (преобразуют угол поворота, угловую скорость и ускорение в электрический сигнал), гироскопические, преобразователи частоты и напряжения, усилители мощности.

Основные типы микромашин: электрические микродвигатели постоянного тока; асинхронные микродвигатели; синхронные микродвигатели (синхронные микродвигатели постоянного вращения, синхронные шаговые микродвигатели); тахогенераторы; сельсины; вращающиеся трансформаторы.

**Классификация по назначению.** По назначению электрические микромашины автоматических устройств подразделяются на следующие группы.

**Силовые микродвигатели** приводят во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и др.

**Управляемые (исполнительные) двигатели** преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отрабатывают определенные команды.

**Тахогенераторы** преобразуют механическое вращение вала в электрический сигнал – напряжение, пропорциональное частоте вращения вала.

**Вращающиеся трансформаторы** дают на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например, синусу или косинусу этого угла или самому углу.

**Машины синхронной связи** (сельсины, магнесины) осуществляют синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей.

**Микромашины гироскопических приборов** (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента) осуществляют вращение роторов гироскопов с высокой частотой коррекцию их положения.

**Электромашинные преобразователи и усилители** преобразуют энергию.

Электрические микромашины первых двух групп часто называют силовыми, а третьей-пятой группы – информационными.

**Классификация по роду тока и принципу действия.** Электрические машины по роду тока делят на машины переменного и постоянного тока.

Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяют на трансформаторы, асинхронные, синхронные и коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования напряжения: в системах передачи и распределения электрической энергии, в выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов и пр. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, а также сельсины.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.). В электрических приводах большой мощности используют также синхронные электродвигатели. В устройствах автоматики широко применяют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, индукторные и пр.).

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко, и главным образом, в качестве электродвигателей. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. В устройствах автоматики, а также в разного рода электробытовых приборах применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

Машины постоянного тока применяют главным образом в качестве электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах (железнодорожный и морской транспорт, прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр.), а также в случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т. п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах). Однако в последнее время генераторы постоянного тока заменяют генераторами переменного тока, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

В системах автоматического регулирования машины постоянного тока широко используют в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

Выделяются две **основные группы требований**, предъявляемых к электрическим микромашинам: *общие требования* и требования, предъявляемые к электрическим микромашинам в зависимости от области применения и условий эксплуатации (*специальные требования*).

### **Требования, предъявляемые к электрическим машинам**

Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие электрические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритные размеры, массу и стоимость. Они должны быть простыми по конструкции, несложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации.

Общие технические требования. Такие требования для машин общего промышленного применения сформулированы в специальном ГОСТе, а для машин специального исполнения – в соответствующих ГОСТах, учитывающих специфические условия работы этих машин.

Каждая электрическая машина рассчитана на работу при определенных условиях эксплуатации: режиме нагрузки, допускаемых перегрузках, напряжении, частоте переменного тока, частоте вращения, температуре охлаждающей среды, высоте над уровнем моря, влажности и др. При этом машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течении установленного времени (обычно в течение времени между периодическими ремонтами).

Надежность работы машины обеспечивается путем закладки достаточных запасов при проектировании, применения высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатации (работы машины в режимах, для которых она спроектирована, и своевременного выполнения профилактических ремонтов).

В основном электрические машины большой, средней и малой мощности работают в качестве преобразователей энергии (двигатели, генераторы, трансформаторы, электромашинные преобразователи). Поэтому для уменьшения эксплуатационных расходов важное значение имеют энергетические показатели машин: КПД и коэффициент мощности. При проектировании электрической машины путем оптимального выбора ее основных параметров и электромагнитных нагрузок стремятся получить наивыгоднейшие значения КПД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке. Однако эти значения связаны определенным образом с номинальной мощностью машины, поэтому, чем меньше номинальная мощность электрической машины, тем меньше ее КПД и коэффициент мощности.

## Требования, предъявляемые к электрическим микромашинам автоматических устройств

Электрические микромашины, кроме общих технических требований, должны также обеспечивать:

- 1) высокую точность преобразования входного сигнала в выходной, например, частоту вращения в выходное напряжение в тахогенераторах или управляющее напряжение в частоту вращения в исполнительных двигателях;
- 2) стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации, например, температуры окружающей среды;
- 3) линейность характеристик при изменении управляющего сигнала и нагрузки;
- 4) высокое быстродействие;
- 5) широкий диапазон регулирования.

Для выполнения этих требований при создании электрической микромашины в ряде случаев отступают от принципов оптимального проектирования, принятых для машин средней и большой мощности. Так, например, для уменьшения погрешностей в информационных электрических микромашинах выбирают относительно небольшие электромагнитные нагрузки и увеличивают воздушный зазор между статором и ротором. В исполнительных двигателях и других микромашинах, выполняющих силовые функции, для увеличения развиваемого машиной момента электромагнитные нагрузки выбирают максимально возможными по условиям отвода теплоты от машины. Это приводит к ухудшению энергетических показателей – КПД и коэффициента мощности, которые весьма важны для электрических машин средней и большой мощности, однако в микромашинах показатели, характеризующие точность, быстродействие, диапазон регулирования, могут иметь преобладающее значение.

Кроме перечисленных требований к отдельным видам микромашин предъявляются специфические требования, обусловленные особенностями их эксплуатации. Так, микромашины, применяемые в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, должны иметь низкий уровень создаваемых шумов; микромашины, используемые в радиоаппаратуре, не должны создавать значительных радиопомех; при установке их, например, в ядерных реакторах и космических аппаратах должна быть обеспечена радиационная устойчивость. Все это также накладывает определенные ограничения на конструкции соответствующих микромашин и приводит к увеличению их массы, габаритных размеров и ухудшению энергетических показателей.

## Тахогенераторы

Тахогенераторы – электрические машины, служащие для преобразования механических перемещений вала в электрический сигнал – выходное напряжение.

Закон преобразования механической величины в электрическую определяется статической характеристикой тахогенератора.

Уравнение статической характеристики идеального тахогенератора:

$$U = K\omega = K \frac{d\alpha}{dt}.$$

Тахогенераторы постоянного тока представляют собой генераторы небольшой мощности с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением.

В режиме холостого хода при постоянном магнитном потоке выходное напряжение тахогенератора равно ЭДС.

$$U_{\text{вых}} = E = c\Phi_{\text{в}}\omega = K\omega = K \frac{d\alpha}{dt}.$$

При подключении нагрузки напряжение уменьшается на величину падения напряжения в цепи якоря.

$$U = E - I_{\text{я}}R_{\text{я}}; I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}};$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{K\omega}{1 + \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{н}}}}.$$

Из уравнения видно, что  $U_{\text{вых}}$  изменяется по линейному закону функции изменения частоты  $\omega$ . Наклон выходной характеристики зависит от  $R_{\text{н}}$ .

### ***1. Частотные преобразователи частоты вращения***

В них измеряется не размер  $U_{\text{вых}}$ , а его частота, которая изменяется пропорционально частоте вращения.

На рис. 16 показан индукционный преобразователь, который имеет двухполюсную магнитную систему 1 с двумя обмотками и диском 2. На обмотку возбуждения подается напряжение от сети постоянного тока, и она служит для создания постоянного магнитного потока. С измерительной обмотки снимается выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ .

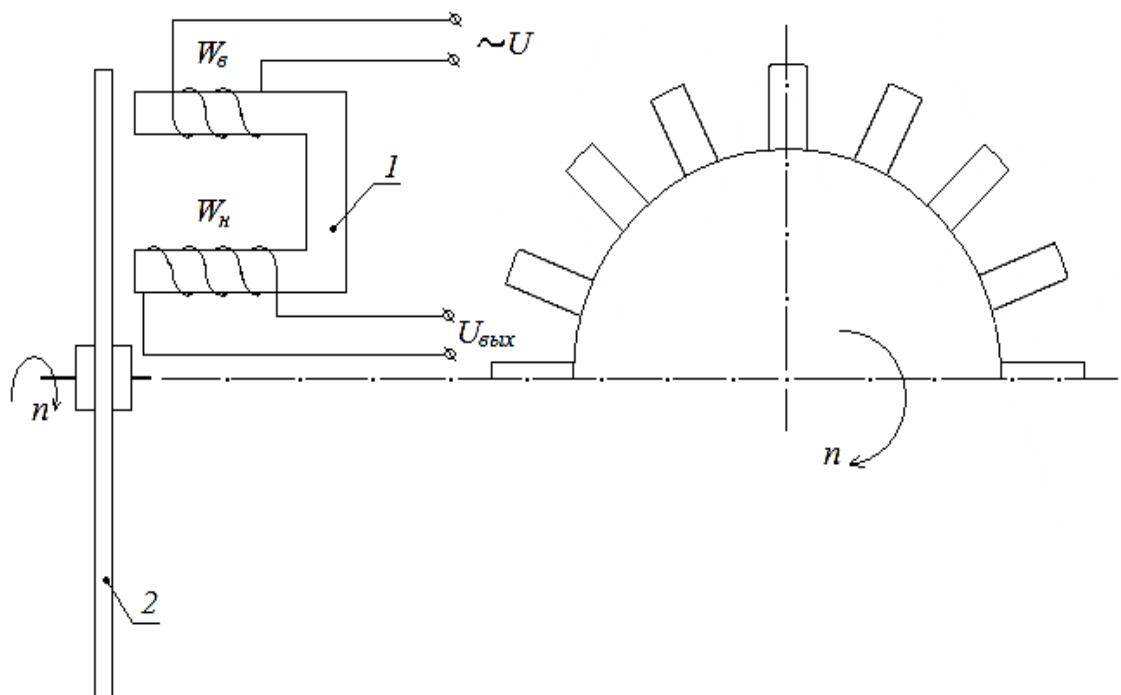


Рис. 16. Частотный преобразователь

Двухтактная магнитная система установлена рядом с диском из ферромагнитного материала, который закреплен на вращающемся валу. Между диском и полюсами имеется воздушный зазор. По периметру зубцы. Высота зубца равна расстоянию между полюсами. При вращении диска происходит периодическое изменение магнитного сопротивления, которое приводит к изменению постоянного магнитного потока. В общем случае кривая ЭДС имеет произвольную форму. Частота ЭДС изменяется прямо пропорционально частоте вращения вала.

$$f_n = \frac{nz}{60},$$

где  $n$  – частота вращения об/мин.;

$z$  – число зубцов.

Видно, что  $f_n$  не зависит от внешних условий, поэтому точность измерения частоты вращения зависит только от точности измерения частоты ЭДС. Сам преобразователь не вносит погрешности в процесс измерения. При малой частоте вращения ЭДС имеет небольшое значение, поэтому при измерении ее частоты возникают большие погрешности.

Часто в индукционных преобразователях в качестве источника постоянного магнитного потока вместо обмотки применяются постоянные магниты, а вместо зубчатого диска – металлическая лента с ответвлениями, закрепленная на вращающемся валу.



## 2. Трансформаторные преобразователи

На рис. 17 трансформаторный преобразователь имеет зубчатый диск 2 из ферромагнитного материала и магнитопровод из «Ш»-образного трансформаторного железа 1 с тремя обмотками.

Между диском и магнитопроводом имеется воздушный зазор. Обмотка возбуждения на среднем стержне питается от сети АС и служит для создания переменного магнитного потока. Измерительные обмотки, расположенные на крайних стержнях, соединяются последовательно – встречно  $W_{H1} = W_{H2}$ . При вращении диска происходит периодическое изменение магнитных сопротивлений между средним и крайними стержнями.

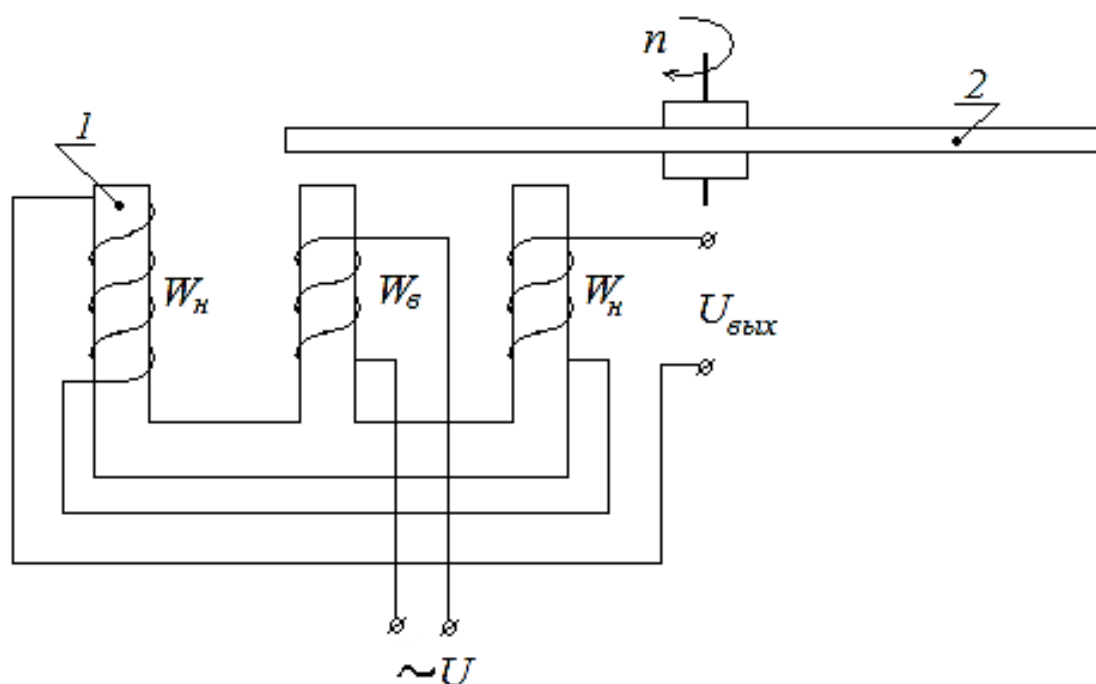


Рис. 17. Трансформаторный преобразователь

Если средний и правый стержни перекрыты зубцом диска, то магнитное сопротивление будет больше магнитного сопротивления между средним и левым стержнями. При отсутствии перекрытия магнитное сопротивление между стержнями равно. Магнитные потоки крайних стержней зависят от соотношения между магнитными сопротивлениями, вследствие чего при вращении диска будет происходить периодическое изменение магнитных потоков. При этом магнитный поток правого стержня периодически возрастает, а левого – периодически уменьшается. Изменение магнитных потоков приводит к изменению соответствующих ЭДС, наводимых в катушках крайних стержней. Выходное напряжение преобразователя равно разности ЭДС правой и левой обмоток.

### 3. Магнитоупругие преобразователи (МУП)

В МУП используется магнитоупругие эффект (МУЭ), который проявляется у всех ферромагнитных материалов. МУЭ заключается в суммировании магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием механических упругих напряжений. Различные ферромагнитные материалы неодинаково реагируют на внешние механические усилия.

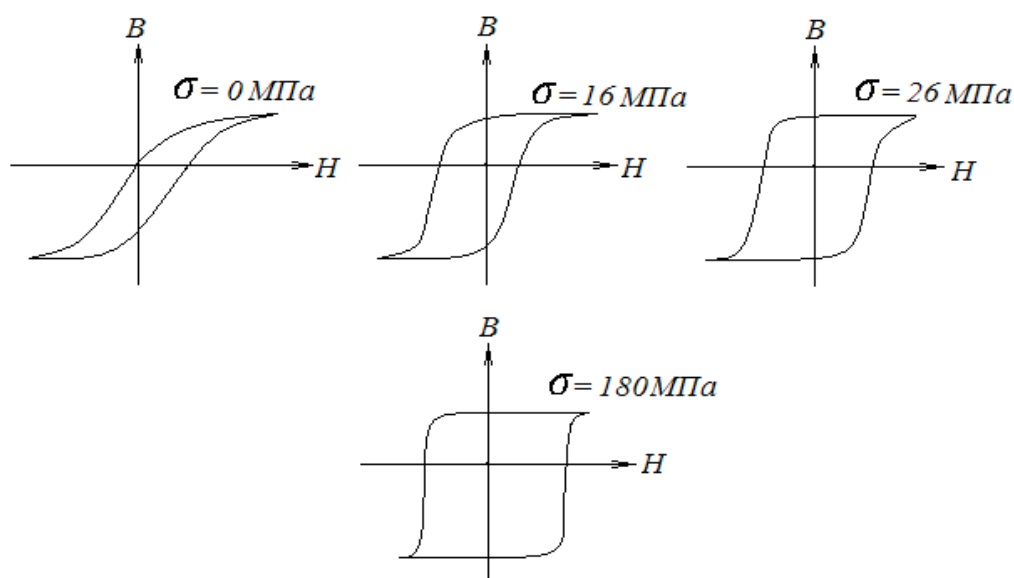


Рис. 18. Характеристики МУЭ

Из анализа кривых характеристик МУЭ (рис. 18) видно, что под действием  $\sigma$  происходит уменьшение магнитной индукции, а следовательно, и проницаемости. Статические характеристики МУП обладают неоднозначностью. Характеристика МУП, соответствующая увеличению его нагрузки, отличается от характеристики его разгрузки. МУП используется для измерения усилий.

#### Сельсин (датчики угла рассогласования)

Сельсин – электрическая машина переменного тока, обладающая способностью самосинхронизации. Имеет две обмотки. Обмотку возбуждения ОВ и обмотку синхронизации ОС.

##### 1. Индикаторный режим работы

Сельсины представляют собой малогабаритные индукционные машины переменного тока с трёхфазной вторичной обмоткой. Наиболее широкое применение они получили в системах синхронной связи. Принципиальная

схема синхронной связи при работе сельсинов в индикаторном режиме представлена на рис. 19.

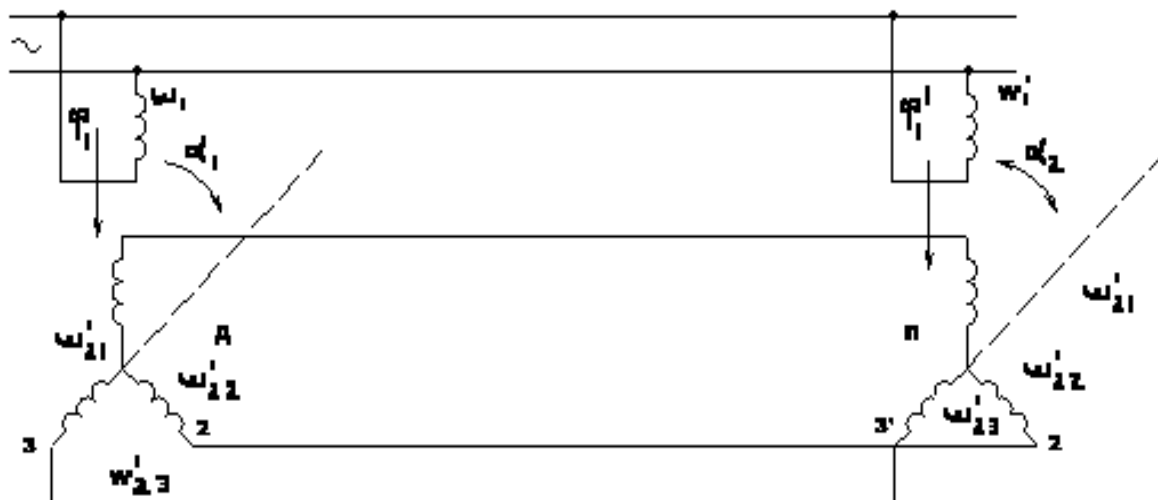


Рис. 19. Соединение сельсинов в индикаторном режиме

Под индикаторным (указательным) режимом работы понимается режим дистанционной передачи углового перемещения датчика Д при работе на стрелку приемника П (так называемая система с нулевым нагрузочным моментом на валу приемника).

Сельсины в индикаторном режиме используются в системах автоматического управления, в дистанционных системах управления и контроля производства, в телеметрии, в вычислительной технике и т. д. В настоящее время сельсины почти вытеснили все другие виды приборов синхронной связи. Это объясняется их весьма ценным свойством: способностью к самосинхронизации независимо от начального положения роторов датчика и приемника (отсюда и название самосин, сельсин).

Все существующие сельсины можно подразделить на два типа: контактные и бесконтактные. В бесконтактных сельсинах однофазная первичная и трёхфазная вторичная обмотки уложены на статор. Ротор представляет собой магнитопровод специальной конструкции.

Контактные сельсины по своей конструкции могут быть подразделены на следующие типы:

1. Сельсины с распределённой однофазной обмоткой на роторе и распределённой трёхфазной обмоткой на статоре (сельсины типа СС-406).

2. Сельсины с сосредоточенной на двух явно выраженных полюсах однофазной обмоткой на статоре и трёхфазной обмоткой на роторе. К этому типу относятся сельсины СС-401, СС-402, СС-404, Д-500, СС-500, ДС-501, СС-501 и др.

3. Сельсины с сосредоточенной на двух явно выраженных полюсах однофазной обмоткой на роторе и трёхфазной обмоткой на статоре. В круг-

лых пазах уложено, кроме того, два короткозамкнутых витка для улучшения характеристик сельсинов и для демпфирования колебания ротора приемника около заданного положения. К этому типу относятся сельсины НС-401, НД-500, ВД-404, НД-501, НД-511, НД-501и др.

Сельсины с распределёнными обмотками (однофазной и короткозамкнутой) на роторе и распределённой трёхфазной обмоткой на статоре. В сельсинах этого типа короткозамкнутая обмотка наматывается как трёхфазная. Затем одна фаза замыкается накоротко, а две другие соединяются последовательно и параллельно. К данному типу относятся, например, сельсины НС-501.

Принцип действия сельсинов, независимо от особенностей их конструкции, одинаков. Как видно из рис. 19, при подключении системы синхронной связи в индикаторном режиме к сети в однофазных обмотках датчика и приемника создаются пульсирующие магнитные потоки  $\phi_1$  и  $\phi'_1$ . Пересекая трёхфазные обмотки датчика и приемника, они индуцируют в них ЭДС.

Система уравнений ЭДС для датчика:

$$\begin{aligned} E_{21} &= E_2 * \cos\alpha_1, \\ E_{22} &= E_2 * \cos(\alpha_1 - 120^\circ), \\ E_{23} &= E_2 * \cos(\alpha_1 + 120^\circ). \end{aligned} \tag{1}$$

Система уравнения ЭДС для приемника:

$$\begin{aligned} E'_{21} &= E'_2 * \cos\alpha_2, \\ E'_{22} &= E'_2 * (\cos\alpha_2 - 120), \\ E'_{23} &= E'_2 * (\cos\alpha_2 + 120). \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь  $E_{21}, E_{22}, E_{23}$  – фазные ЭДС;  $E_2$  и  $E'_2$  – максимальные фазные ЭДС датчика и приемника, наводимые фазы в трехфазных обмотках при совпадении магнитной оси одной из фаз трехфазной обмотки с осью однофазной обмотки;  $\alpha_1$  – угол отклонения ротора датчика от начального положения (при котором магнитная ось однофазной обмотки совпадает с первой фазой трехфазной обмотки);  $\alpha_2$  – угол отклонения ротора приемника от начального положения.

Для сельсинов датчика и приемника в индикаторном режиме всегда  $E_2 = E'_2$ . Поэтому, если  $\alpha_1 = \alpha_2$ , то как следует из систем уравнений 1 и 2, при встречном включении фаз датчика и приемника все результирующие фазовые ЭДС ( $\Delta E = E_{21} - E'_{21}$  и т. д.) равны нулю. Таким образом, при  $\alpha_1 = \alpha_2$  уравнительных токов в фазах трехфазных обмоток датчика и приемника не будет, и, следовательно, синхронизирующие моменты будут отсутствовать. Если ротор датчика перевести в другое положение (изменить на  $\alpha_1$ ), а затем закрепить (затормозить), то угол рассогласования  $\theta = \alpha_1 - \alpha_2$  не будет равен

нулю. В этом случае по линейным проводам трехфазных обмоток потекут уравнивающие токи, так как  $\Delta E_1 \neq \Delta E_2 \neq \Delta E_3$ . При взаимодействии потоков, создаваемых уравнивающими токами, с первичным потоком  $\phi_1$  возникают синхронизирующие моменты на валах роторов датчика и приемника. И так как ротор сельсин-приемника не заторможен, то он будет стремиться повернуться в синфазное положение с ротором датчика (т. е. в положение, когда  $\theta = \alpha_1 - \alpha_2 = 0$ ).

Из систем уравнений 1 и 2 следует также, что в пределах одного ротора датчика любому  $\alpha$ , соответствует лишь одно единственное положение ротора приемника, при котором будут отсутствовать уравнивающие токи, а следовательно, и синхронизирующие моменты. Это явление называется самосинхронизацией. Кроме явления самосинхронизации, положительным свойством индикаторной системы на сельсинах является то, что величина синхронизирующего момента зависит только от величины угла рассогласования  $\theta$  и не зависит положения ротора датчика и приемника по отношению к начальному положению. Это следует из приведенных выше систем уравнений 1 и 2.

Электромагнитные процессы в бесконтактном сельсине аналогичны электромагнитным процессам, происходящим в контактном сельсине. Особенностью их является то, что однофазная и трехфазная обмотки неподвижны и находятся на статоре. На магнитный поток  $\phi_1$  однофазной обмотки  $\omega_1$  при повороте ротора сельсин поворачивается синхронно и синфазно с ним. Это достигается специальной конструкцией магнитопровода для потоков  $\phi_1$  (ротор имеет две магнитопроводящие части с продольной шихтовкой роторных пакетов, а также специальный внешний магнитопровод). Поскольку поток поворачивается вместе ротором, то при  $\theta = 0$  возникают уравнивающие токи, и далее все происходит так, как описано выше для контактных сельсинов.

**Основными характеристиками сельсинов в индикаторном режиме являются:**

1. Статический вращающий момент приемника  $M_{ст} = \varphi(\theta)$ .

На рис. 20 представлены кривые  $M_{ст} = \varphi(\theta)$  для следующих типов сельсинов:

- контактного сельсина с однофазной обмоткой на явнополюсном роторе и поперечными короткозамкнутыми витками на роторе (кривая 1);
- контактного сельсина с распределёнными однофазной и трехфазной обмотками без короткозамкнутой обмотки (кривая 2);
- контактного сельсина с распределёнными однофазной и короткозамкнутой обмотками на статоре (кривая 3);
- бесконтактного сельсина (кривая 4).

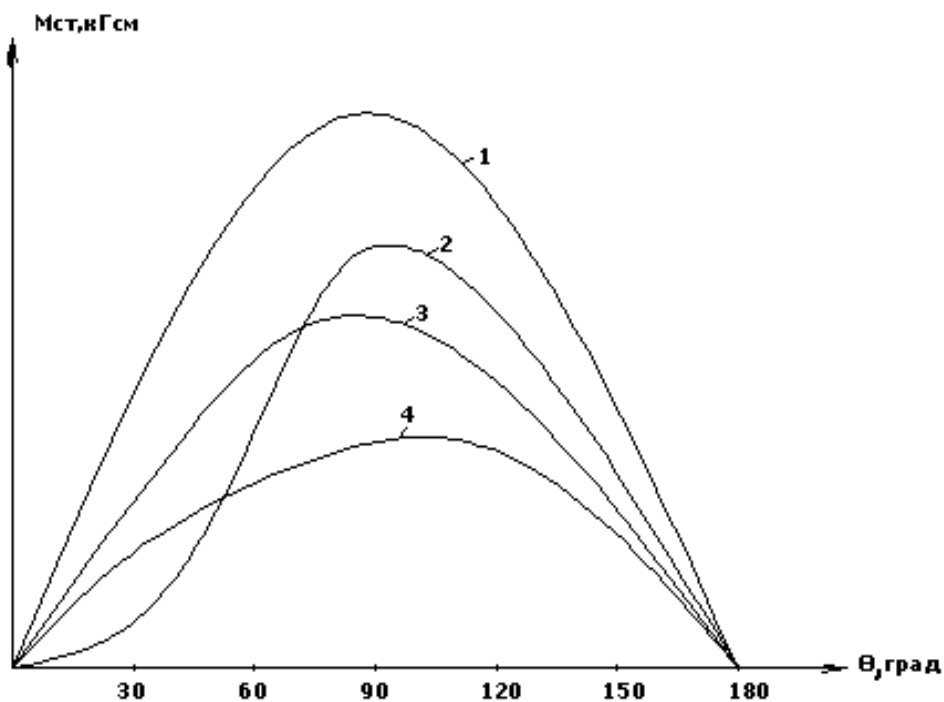


Рис. 20. Кривые зависимостей  $M_{ст} = \varphi(\theta)$

2. Удельный синхронизирующий момент, мм/град

$$M_{уд} = \frac{dM_{ст}}{d\theta}. \quad (3)$$

3. Суммарный тормозной момент, равный сумме момента трения и реактивного момента (последний имеет место вследствие магнитной и электрической асимметрии сельсинов)

$$m_T = (m_{тр} + m_p). \quad (4)$$

4. Статическая ошибка системы, град

$$\theta_{ст} = \frac{m_m}{m_{уд}}. \quad (5)$$

5. Добротность сельсина, 1/град

$$A = \frac{m_m}{m_{уд}} = \frac{1}{\theta_{ст}}. \quad (6)$$

В обмотках синхронизации СД и СП создается результирующая МДС, следовательно, и магнитные потоки, которые, взаимодействуя с потоками возбуждения, вызывают появление вращающихся моментов, называемыми синхронизирующими.

Синхронизирующий момент СД стремится повернуть ротор СД в исходное положение, а синхронизирующий момент СП – в сторону поворо-

та СД. Ротор СД связан с задающей осью и после поворота остается в фиксированном положении, поэтому под действием синхронизирующего момента будет поворачиваться ротор СП до тех пор, пока не перейдет в согласованное положение с ротором СД.

## 2. Трансформаторный режим

Сельсины, работающие в автотрансформаторном режиме, применяются для дистанционного измерения угла рассогласования между задающей и исполнительной осями. Принципиальная схема такой системы представлена на рис. 21. Как видно из этой схемы, однофазная обмотка сельсин-приемника включается на вход усилителя У. После усиления сигнал рассогласования подается на исполнительный элемент ИЭ, который в свою очередь механически связан с сельсин-приемником.

Конструкции сельсинов, используемых для трансформаторного режима, те же, что и для индикаторного режима, однако наиболее оптимальным является применение сельсинов с распределенными обмотками на статоре.

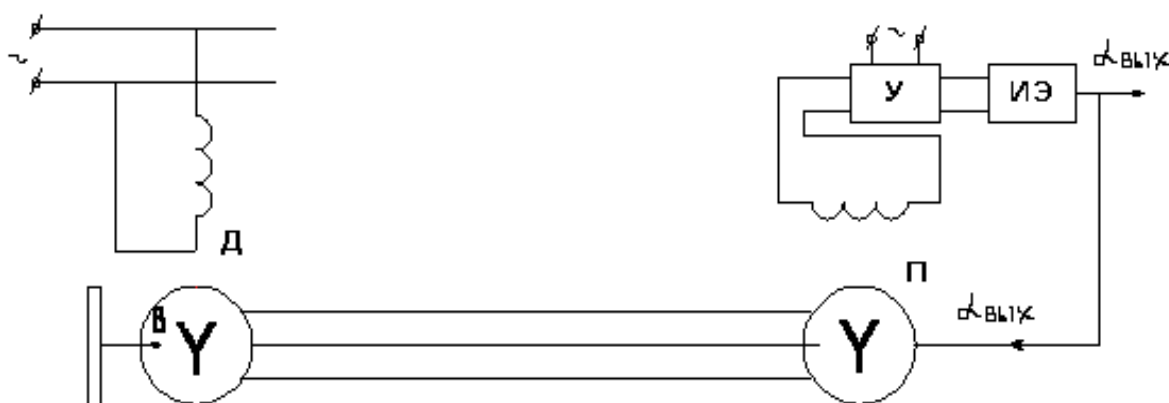


Рис. 21. Соединение сельсинов в трансформаторном режиме

Физические процессы, происходящие в сельсинах, работающих в трансформаторном режиме, имеют свои особенности. При подключении однофазной обмотки датчика к сети магнитный поток  $\phi$  создаёт пульсирующие фазные ЭДС в трёхфазной обмотке датчика. Так как однофазная обмотка сельсин-приемника не подключена к сети, в её трёхфазной обмотке при любом положении ротора приемника будут протекать уравнительные токи. Эти токи создают в трёхфазной обмотке сельсин-приемника пульсирующий поток, наводящий в однофазной (трансформаторной) обмотке сельсин-приемника ЭДС, величина которой зависит от угла рассогласования  $\theta = \alpha_{\text{ВХ}} - \alpha_{\text{ВЫХ}}$ . Для того, чтобы при  $\theta = 0$  выходное (управляющее) напряжение  $U_y$  было равно нулю, роторы датчика и приемника предварительно рас-

согласовываются на угол  $90^\circ$ . Отсчёт углов рассогласования ведётся от этого «нулевого» положения. Величина выходного управляющего напряжения (управляющим оно называется потому, что «управляет» через усилитель исполнительным элементом следящей системы) может быть подсчитана по формуле

$$U_y = K_1 K_2 E_2 \sin \theta,$$

где  $\theta$  – угол рассогласования;  $E_2$  – максимальная ЭДС сельсин-датчика, наводимая в любой из фаз трёхфазной обмотки датчика при совпадении магнитной оси данной фазы с магнитной осью однофазной обмотки;  $K_1$  – коэффициент, зависящий от электрических параметров трёхфазных обмоток датчика и приемника;  $K_2$  – коэффициент трансформации от однофазной обмотки приёмника к его трёхфазной обмотке.

Для уменьшения погрешностей измерения сельсины должны обладать малой электромагнитной асимметрией. Этому условию наиболее полно удовлетворяют сельсины с распределёнными однофазной и трёхфазной обмотками без короткозамкнутых витков (например, сельсин СС-405).

При включении однофазной обмотки приёмника на нагрузку управляющее напряжение  $U_y$  будет меньше, чем при холостом ходе (примерный характер зависимости представлен на рис. 22). Это уменьшение зависит от величины взаимодействия магнитных потоков однофазной и трёхфазной обмоток сельсин – приемника при протекании тока нагрузки по однофазной обмотке, соотношения сопротивлений цепи нагрузки и однофазной обмотки сельсин – приемника и т. д.

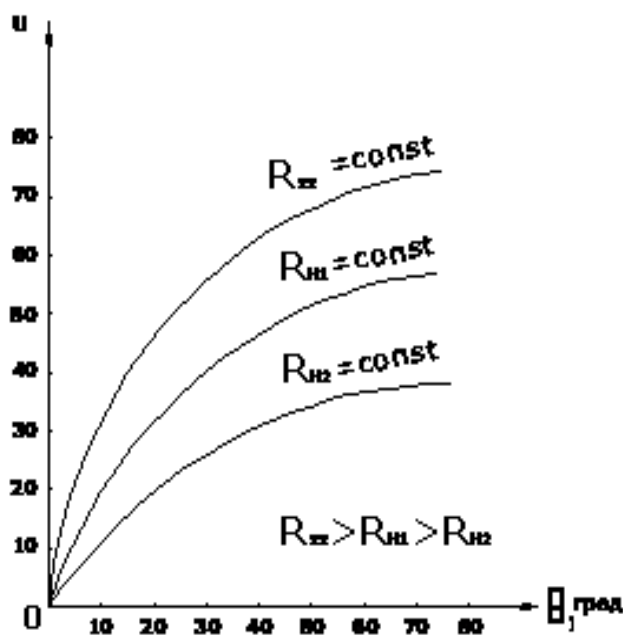


Рис. 22. Кривые зависимостей  $U = f(\theta)$



### 3. Дифференциальный режим сельсинов

Дифференциальные сельсины передают на выходной вал следящей системы сумму или разность углов, создаваемых двумя сельсинами-датчиками, каждый из которых соединен независимо друг от друга со своим входным валом. Однако, дифференциальные сельсины, в зависимости от схемы соединения, могут работать и датчиками.

На статоре и роторе дифференциального сельсина размещены трехфазные обмотки. Отношение числа витков в статорной и роторной обмотках выбирается таким, чтобы отношение напряжений было один к одному. Для возмещения потерь в машине роторная обмотка имеет несколько большее число витков, чем статорная. Схема соединения дифференциального сельсина с датчиками показана на рис. 23.

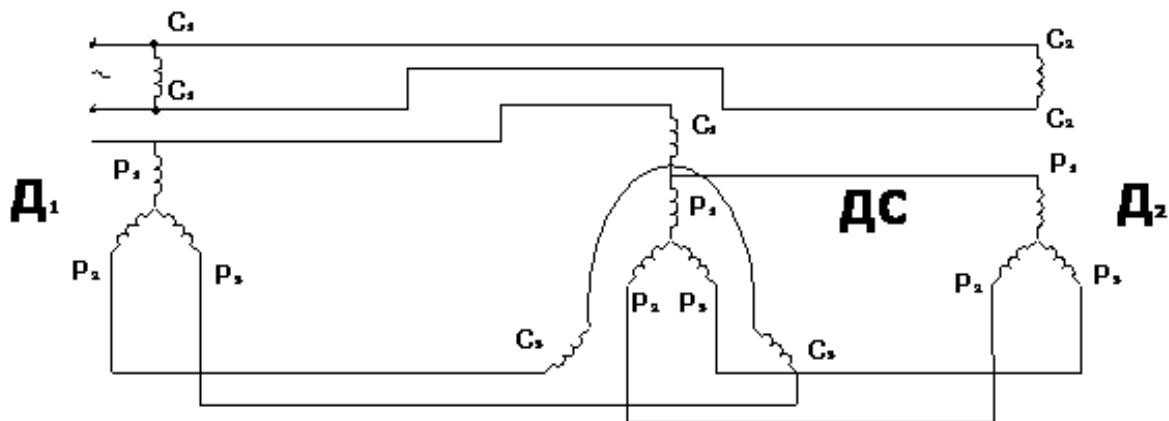


Рис. 23. Соединение дифференциального сельсина с однофазными сельсинами

Потоки возбуждения датчиков  $D_1$  и  $D_2$  наводят ЭДС в соответствующих трехфазных обмотках датчиков. Под действием этих ЭДС по трехфазным обмоткам датчиков и дифференциального сельсина протекают токи, создающие в обмотках дифференциального сельсина два пульсирующих магнитных потока  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Если оси этих потоков взаимно перпендикулярны, дифференциальный сельсин неподвижен. Если оси этих потоков не взаимно перпендикулярны, дифференциальный сельсин отработывает, либо сумму, либо разность  $\theta = \theta_1 - \theta_2$  в зависимости от встречного или согласного поворота входных валов. Здесь  $\theta$  – угол поворота дифференциального сельсина;  $\theta_1$  – угол поворота датчика  $D_1$ ;  $\theta_2$  – угол поворота датчика  $D_2$ .

#### Промежуточное тестирование

1. Дайте определение электрической микромашины.
2. Типы электрических микромашин.
3. Группы классификации электрических микромашин по назначению.

## ГЛАВА 4. Виды и характеристики измерительных преобразователей и датчиков электрических величин. Принципы построения и особенности реализации

### Резистивные преобразователи

#### Реостатные преобразователи

Реостатным преобразователем называют реостат, подвижный контакт которого перемещается в соответствии со значением измеряемой величины. Естественная входная величина реостатного преобразователя – перемещение, выходная – активное сопротивление.

Используют реостатные преобразователи двух основных типов: *проволочные* и *пленочные*. Наибольшее распространение получили проволочные преобразователи, схема конструкции которых приведена на рис. 24, а. На неподвижный каркас плотно наматывают изолированный провод, который образует обмотку с сопротивлением  $R$ . Обмотка включается в цепь постоянного напряжения  $V$ . На обмотке очищается от изоляции «контактная дорожка», по которой может перемещаться щетка 1, жестко закрепленная в щеткодержателе 2. При этом создается скользящая контактная пара: щетка – контактная дорожка. Каркас преобразователя изготавливают из изоляционных материалов: эбонита, текстолита, радиокерамики и других.

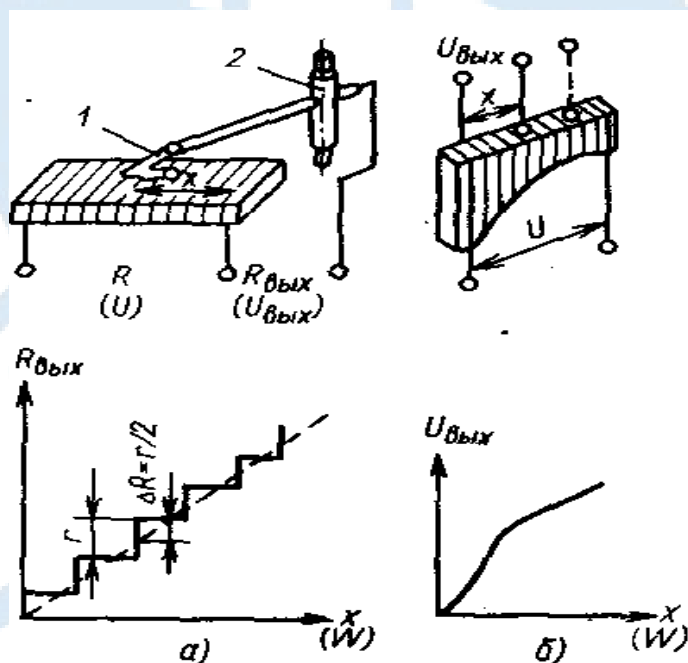


Рис. 24. Реостатные преобразователи

Наиболее распространенными материалами являются манганин, константан, а также сплавы из благородных металлов; золота с никелем, серебра

с медью и других. Диаметр провода изменяется, в пределах 0,03-0,1 мм – для прецизионных реостатов и достигает 0,3 мм – в грубых реостатах. Щетку выполняют в виде двух-трех проволочек диаметром 0,1-0,2 мм. Каркас может иметь не только прямоугольную, но и более сложную форму. Для получения нелинейной характеристики используют фигурные каркасы (рис. 24). Статической характеристикой реостатного преобразователя является зависимость  $R_{\text{вых}} = f(x)$  или  $U_{\text{вых}} = \psi(x)$ , где  $x$  – перемещение щетки. Эти зависимости могут быть линейными (рис. 24, а) и нелинейными (рис. 24, б). На рис. 24, а сплошной линией показана реальная характеристика проволочных реостатных преобразователей. Ступенчатый вид характеристики показывает, что при движении щетки в момент перехода от одного витка к другому сопротивление или напряжение изменяется скачками. С помощью ступенчатой кривой определяется порог чувствительности или витковая погрешность преобразователя. Для линейного реостата витковая погрешность определяется.

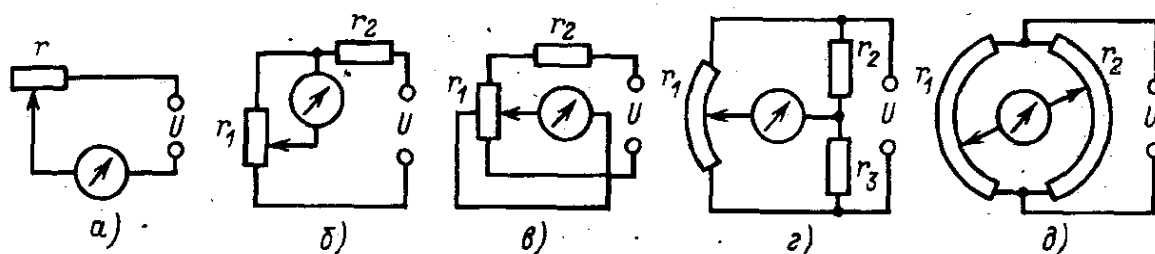


Рис. 25. Схемы включения реостатных преобразователей

Наиболее распространенные схемы включения реостатных преобразователей приведены на рис. 25. Недосток первых трех схем – нелинейная зависимость тока от перемещения движка. Значительно меньшую нелинейность имеют мостовые схемы (рис. 25, г и д). Расчет линейного реостатного преобразователя сводится к определению диаметра и длины намоточного провода, а также геометрических размеров каркаса. Реостатные преобразователи применяют для измерения перемещений. В сочетании с упругими элементами их используют в датчиках для измерения усилий и давлений. Основной недостаток реостатных преобразователей – наличие трущегося контакта, которое приводит, с одной стороны, к уменьшению надежности, с другой – к возникновению погрешности преобразователя вследствие изменения контактного сопротивления. Во многих случаях нежелательное явление – наличие дискретности.

### **Тензорезисторные преобразователи**

В основе работы тензорезисторных преобразователей лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. Входная величина преобразо-

вателя – деформация, выходная – изменение сопротивления. В настоящее время получили распространение проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. В наиболее простом случае тензорезисторы представляют собой отрезок проволоки, который жестко закреплен при помощи клея или цемента на упругодеформируемой детали. Сжатие или растяжение детали вызывает пропорциональное сжатие или растяжение проволоки, в результате чего изменяются ее длина, поперечное сечение и удельное сопротивление, что в итоге приводит к изменению электрического сопротивления проволоки:

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

где  $l$  – длина;  $S$  – поперечное сечение;  $\rho$  – удельное сопротивление проволоки.

При растяжении ее сопротивление изменится на величину  $\Delta R$  и составит  $R + \Delta R$ . Относительное изменение сопротивления тензорезистора равно:

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

где  $\Delta l$  – изменение длины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона:  $\mu = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta l}{l}$  – отношение относительного поперечного сужения (растяжения) к относительному продольному удлинению (сжатию). Частное от деления относительного изменения сопротивления  $\frac{\Delta R}{R} = \epsilon_R$  на относительное изменение проводника

$\frac{\Delta l}{l} = \epsilon_i$  – в пределах упругой деформации характеризуется постоянной величиной, которая называется *коэффициентом тензочувствительности*

$\frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_i} = k_T$ . Коэффициент тензочувствительности – основная характеристика тензорезистора.

Сопротивление преобразователя не должно изменяться от действия внешних факторов (температуры и других) более чем на сотые доли процента. Для измерений приходится применять высокочувствительную аппаратуру – основной недостаток металлических тензорезисторных преобразователей. Конструктивно проволочные тензосопротивления представляют собой спираль (решетку), состоящую из нескольких петель (витков) проволоки, наклеенных на тонкую бумажную (пленочную) основу (рис. 26). Сверху решетка закрыта также тонкой бумагой или пленкой. Длина петли  $l_6$  называется *базой преобразователя*. Обычно  $l_6 = 8-15$  мм. Применяются тензорезисторы с меньшей базой (до 2,5 мм). Ширина преобразователей от 3

до 10 мм, сопротивление порядка 50-150 Ом. Изготавливают преобразователи и больших размеров (до 100 мм), имеющие сопротивление 800-1 000 Ом. Промышленность выпускает достаточно разнообразный ассортимент проволочных тензорезисторов. Более совершенные тензорезисторы – фольговые. Они имеют решетку в виде тонких полосок фольги прямоугольного сечения, наносимых на лаковую основу. Из-за большей площади соприкосновения полосы фольгового тензорезистора с объектом измерения и большой теплоотдачи, чем у проволочного, он имеет большую чувствительность и по нему можно пропустить больший ток. Кроме того, преимущество фольговых тензорезисторов – в возможности изготовления решеток любого рисунка, наиболее полно удовлетворяющего условиям измерений.

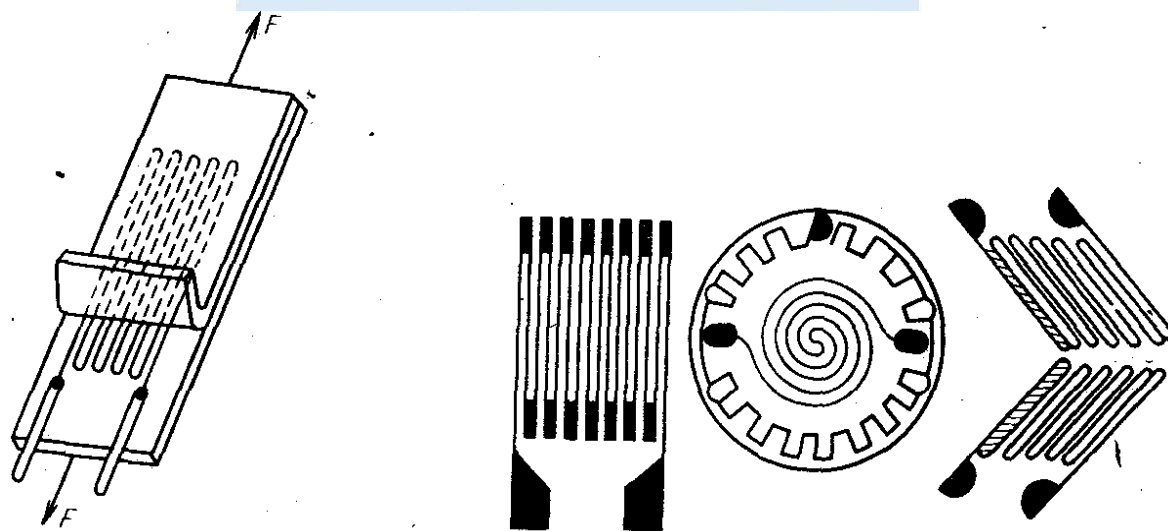


Рис. 26. Проволочный и фольговые тензорезисторы

Основа полупроводниковых тензорезисторов – кристалл кремния или германия. В зависимости от количества примесей типа  $p$  или  $n$  сопротивление пластинок тензорезисторов изменяется от 100 Ом до 10 кОм. Знак тензоэффекта (при растяжении) в полупроводниках  $n$ -типа проводимости – отрицательный, а  $p$ -типа – положительный. Проводимость  $p$ -типа имеют тензорезисторы КТД, а  $n$ -типа – КТЭ.

Недостаток полупроводниковых тензорезисторов – малые значения прочности и гибкости. Другой недостаток в том, что, несмотря на большую тензочувствительность, реализовать ее довольно сложно из-за нелинейности характеристик, высокой чувствительности к воздействию внешних условий (температуры, освещения и т. д.) и существенного разброса параметров от образца к образцу. При выборе метода измерения механических величин тензорезисторам часто отдают предпочтение. Действительно, они являются универсальными преобразователями и могут с успехом использоваться во многих случаях, но они не всегда представляют собой лучшее средство. Тензорезисторные датчики представляют собой упругий элемент, на кото-

рый наклеены тензорезисторы. Деформация упругого элемента должна иметь достаточно большую величину. Это обстоятельство часто недооценивается при выборе метода измерения. Так, например, датчик давления, представляющий собой диафрагму с наклеенными на ней тензорезисторами, имеет линейную характеристику только в диапазоне относительно малых деформаций. Индуктивный или емкостный преобразователи в этом случае имеют лучшую линейность при более высоком уровне сигнала. Преобразователи имеют широкую область применения, прежде всего датчики динамометров для измерения усилий. Большинство динамометров представляют собой цилиндрическую колонку, которая подвергается сжатию. Для измерения усилий ниже 1 т обычно применяют кольцевые динамометры с наклеенными тензорезисторами. Для измерения давления применяются датчики с консольной балкой. При изменении температуры возникает погрешность за счет изменения сопротивления от температуры независимо от деформации, т. е. изменение от температуры крутизны градуировочной характеристики, вызванное температурной зависимостью модуля упругости упругого элемента, на который наклеены тензорезисторы, и сопротивления тензорезистора. Температурная коррекция выполняется путем включения последовательно и параллельно с тензорезистором сопротивления с отрицательным температурным коэффициентом (рис. 27, а).

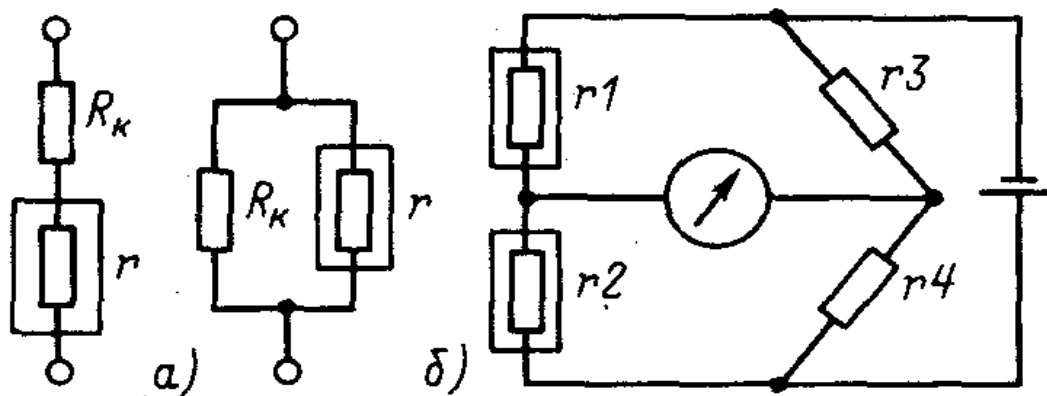


Рис. 27. Схемы включения тензорезисторов

Корректирующие сопротивления должны обладать как можно большим температурным коэффициентом, чтобы их значения были меньше сопротивления тензорезистора. Этому требованию удовлетворяют только полупроводниковые материалы (термисторы).

Температурная коррекция выполняется также путем включения пар тензорезисторов в смежные плечи моста (рис. 27, б).

## Электромагнитные преобразователи

### Индуктивные преобразователи

Преобразователи, преобразующие естественную входную величину в виде перемещения в изменение индуктивности, называются индуктивными. Индуктивный преобразователь представляет собой дроссель с изменяющимся воздушным зазором (рис. 28, а) или изменяющейся площадью поперечного сечения (рис. 28, б).

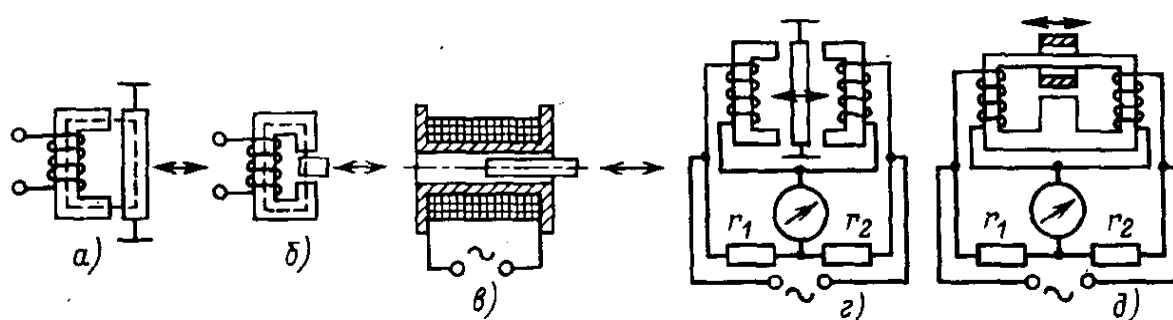


Рис. 28. Конструкция и схемы включения индуктивных преобразователей

Выходной параметр индуктивного преобразователя – изменение индуктивности  $L$  обмотки, надетой на сердечник, при изменении зазора  $\delta$  или площади  $S$ .

Для измерения больших перемещений применяют индуктивные преобразователи соленоидного типа (рис. 28, в). Изменение индуктивности в этих преобразователях вызывается перемещением в катушке ферромагнитного сердечника. Соленоидные преобразователи могут применяться для измерения перемещений 100-1 000 мм. Особенность индуктивных преобразователей в том, что чувствительность их к внешним факторам не зависит от чувствительности к измеряемой величине, поэтому увеличение чувствительности к измеряемой величине приводит к уменьшению погрешности преобразователя. Индуктивные преобразователи применяют для измерения перемещений, толщины покрытий, в микромерах. Изготавливают также индуктивные динамометры и манометры, в которых усилие и давление преобразуется в перемещение при помощи упругих элементов, т. е. промежуточных преобразователей. При эксплуатации индуктивных преобразователей следует учитывать электромеханическую силу, действующую на подвижный сердечник. Поэтому их можно использовать только для измерения достаточно больших сил. Динамические характеристики индуктивных преобразователей определяются в основном параметрами подвижной механической системы, которая чаще всего является колебательной.

## Трансформаторные преобразователи

Трансформаторный преобразователь представляет собой трансформатор, у которого под влиянием входного сигнала изменяется временная индуктивность, что приводит к изменению вторичного выходного напряжения.

На рис. 29 (а, б) показаны трансформаторные преобразователи с подвижным сердечником.

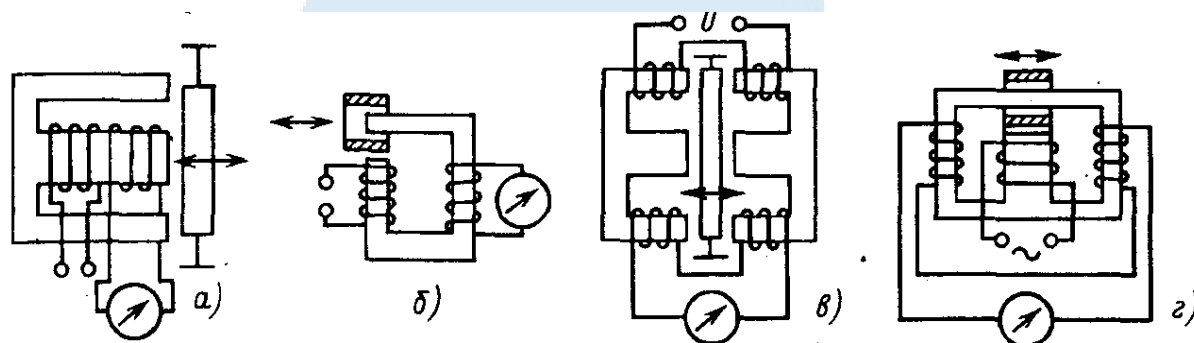


Рис. 29. Конструкции и схемы включения трансформаторных преобразователей

Достоинства трансформаторных преобразователей: достаточная мощность сигнала без усилительных устройств, сравнительная простота для измерения усилий и давлений. Трансформаторные преобразователи применяют в сочетании с упругими элементами (мембранами, пружинами). Недостатки индуктивных и трансформаторных преобразователей – в большой инерционности, необходимости регулировки и компенсации начального напряжения на выходе преобразователя. Кроме того, для уменьшения помех оба преобразователя нуждаются в тщательной экранировке, что увеличивает размеры и массу преобразователя. Погрешности трансформаторных преобразователей вызываются в основном нестабильностью напряжения и частоты источника питания, а также влиянием изменения температуры. При измерении динамических процессов частота источника питания должна быть значительно выше частоты измеряемого процесса. При измерении медленно меняющихся процессов преобразователь подключают к источнику питания промышленной частоты.

## Магнитоупругие преобразователи

Преобразователи, основанные на изменении магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под воздействием механической деформации, называют магнитоупругими. Магнитоупругий преобразователь представляет собой ферромагнитный сердечник с одной или двумя обмотками, к которому прикладываются механические усилия. Усилие создает в сердечнике механическое напряжение, которое приводит к изменению магнит-



ной проницаемости  $\mu$  и, следовательно, к изменению магнитного сопротивления, что обуславливает изменение электрического сопротивления  $Z$  катушки. Таким образом, в магнитоупругом преобразователе имеется следующая цепь преобразований:  $F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R \rightarrow Z$  или  $e$ . Магнитоупругий эффект объясняется дополнительным магнитным взаимодействием атомов вследствие искажения атомной решетки кристалла от воздействия механических усилий. В общем случае зависимость магнитной проницаемости от механических напряжений имеет довольно нелинейный характер. Однако, выбирая оптимальные режимы работы, можно получить относительно линейную зависимость.

Существует большое разнообразие конструктивных форм магнитоупругих преобразователей. Их можно разбить на две основные группы: преобразователи дроссельного и трансформаторного типов. В преобразователях дроссельного типа изменение магнитной проницаемости сердечника приводит к изменению полного электрического сопротивления катушки дросселя. В преобразователях трансформаторного типа в качестве выходной величины используется взаимная индуктивность. Такие преобразователи – по существу трансформаторные с переменным коэффициентом трансформации. Конструкции основных типов магнитоупругих преобразователей показаны на рис. 30, 31.

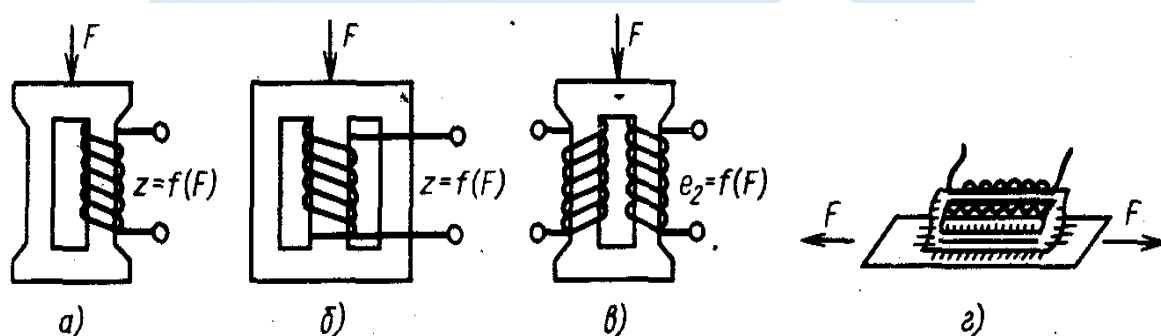


Рис. 30. Конструкции магнитоупругих преобразователей

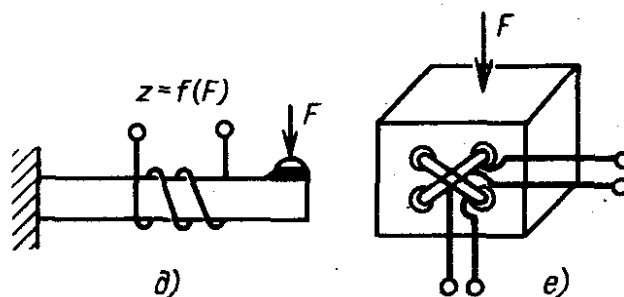


Рис. 31. Конструкции магнитоупругих преобразователей

Сердечник преобразователя при измерении сосредоточенных сил может претерпевать деформацию сжатия (растяжения) (рис. 30, *а, б* и *в*) или изгиба (рис. 31, *д*). На рис. 31, *г* изображен тензометрический магнитоупругий преобразователь, магнитная цепь которого выполнена из тонкого листа пермаллоя, наклеенного на исследуемую деталь.

В преобразователях, приведенных на рис. 30 *а-г* и рис. 31, *д*, используется эффект изменения магнитной проницаемости сердечника в одном направлении. В настоящее время широкое применение получили магнитоупругие преобразователи, в которых используется изменение магнитной проницаемости одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. магнитная анизотропия сердечника. На рис. 31, *е* показана конструкция магнитоанизотропного преобразователя со скрещенными обмотками. Первичная и вторичная обмотки расположены в сплошном магнитопроводе под прямым углом друг к другу. В ненагруженном состоянии преобразователя силовые линии первичной обмотки не пересекают вторичную обмотку, в результате чего ЭДС вторичной обмотки равно нулю. При действии усилия вследствие изменения магнитной проницаемости материала магнитное поле вытягивается в направлении большей проницаемости, сжимается в направлении меньшей проницаемости и, сцепляясь со вторичной обмоткой, индуцирует в ней ЭДС, пропорциональную приложенному усилию.

Магнитострикционный эффект – четный эффект, т. е. знак деформации сердечника не меняется при перемене направления поля на обратное. Частота изменения деформаций или колебаний сердечника в 2 раза больше частоты переменного тока, протекающего через обмотку преобразователя. На магнитострикционном эффекте основана работа магнитострикционных ультразвуковых преобразователей или излучателей.

Основные достоинства магнитоупругих преобразователей: высокие мощность и уровень выходного сигнала, надежность, простота конструкции. Однако магнитоупругие преобразователи обладают довольно большими погрешностями. Основные источники погрешностей: температурная погрешность и магнитоупругий гистерезис. При быстроизменяющихся усилиях следует учитывать также инерционность магнитоупругих преобразователей.

### ***Индукционные преобразователи***

Преобразователи, в которых используется явление электромагнитной индукции, т.е. наведение ЭДС в электрическом контуре при изменении магнитного потока, называются индукционными. По принципу действия индукционные преобразователи подразделяются на две группы. В преобразователях первой группы магнитное сопротивление постоянного магнитного потока остается неизменным, а индуцированная ЭДС наводится из-за линейных или угловых перемещений сердечника катушки в зазоре.

Индукционные преобразователи вибрации (как и пьезоэлектрические) относятся к датчикам генераторного типа. Принцип действия индукционных преобразователей основан на явлении электромагнитной индукции, т. е. на возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в электрической катушке при изменении магнитного поля.

К достоинствам индукционных преобразователей можно отнести простоту конструкции и надежность в эксплуатации. Основной их недостаток связан с принципом действия, практически ограничивающим нижний диапазон измеряемых частот пределом 8-10 Гц. Кроме того, индукционные преобразователи имеют значительно большую массу, чем пьезоэлектрические, что снижает максимальное значение измеряемых частот до 500-1 500 Гц.

Конструктивно индукционный преобразователь состоит из корпуса, сейсмической массы на маятниковой или осевой подвеске и индукционного элемента. При колебаниях сейсмической массы происходит относительное перемещение катушки и постоянного магнита специальной формы, в результате чего в катушке наводится ЭДС. Для повышения чувствительности преобразователя увеличивают число витков катушки. Но увеличение числа витков приводит к повышению реактивного сопротивления катушки и увеличению массы преобразователя, а, следовательно, к уменьшению частотного диапазона измерения со стороны высоких частот.

Многие из существующих индукционных преобразователей обладают чувствительностью, достаточной для регистрации измерительного электрического сигнала без дополнительного усиления.

### ***Индуктивные преобразователи***

Индуктивный преобразователь является параметрическим – перемещение одного из его элементов при вибрации вызывает изменение индуктивности системы и ее сопротивления переменному току.

На рис. 32 показаны основные схемы построения индуктивных преобразователей – с переменной площадью зазора, с переменной длиной зазора и с подвижным цилиндрическим сердечником. Для всех вариантов обычно используется дифференциальная мостовая схема включения.

Индуктивные преобразователи имеют гораздо меньшую массу, чем индукционные, тем не менее, область их применения ограничена измерением низкочастотных вибраций. Это связано с тем, что частота тока питания (несущего сигнала) не может превышать 3-5 кГц из-за возникновения вихревых магнитных потоков в сердечнике и значительных паразитных емкостей и индуктивностей соединительных проводов. При этом для надежной работы преобразователя необходимо, чтобы частота измеряемого процесса была в 5-10 раз ниже частоты несущего сигнала.

Основным достоинством индуктивных преобразователей является их простота, возможность применения при повышенных температурах и высокая чувствительность.

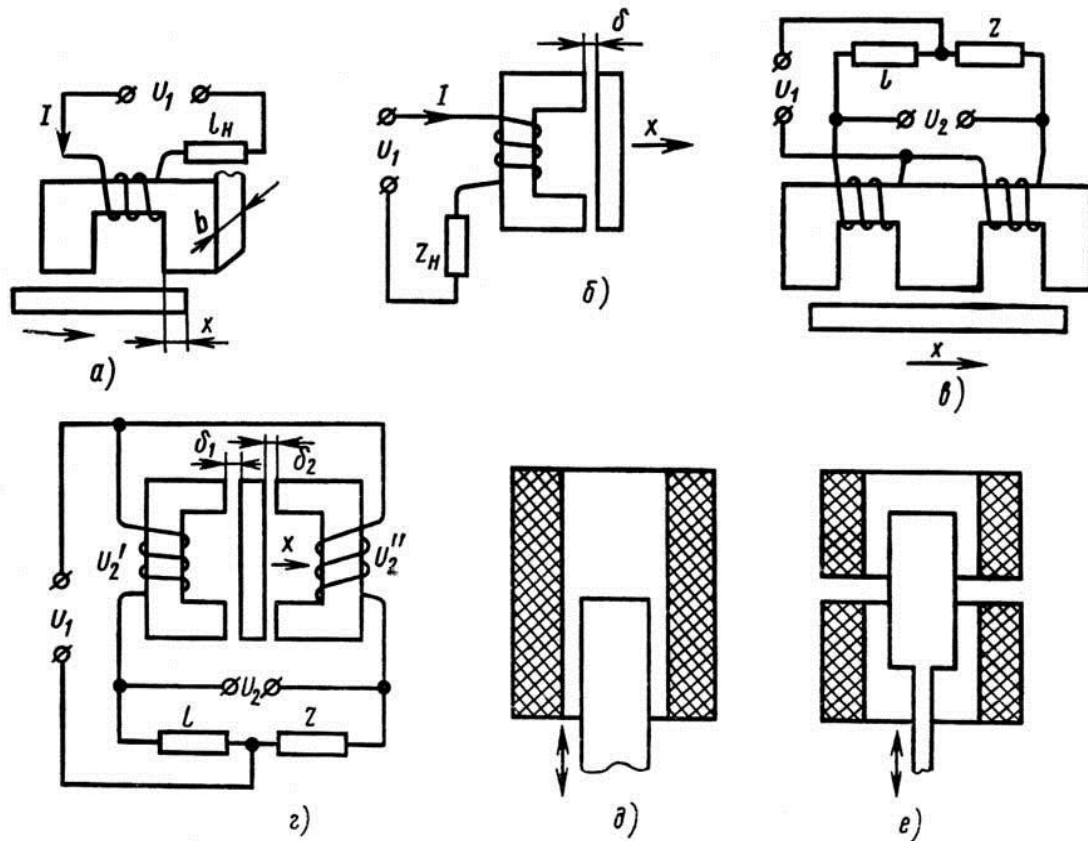


Рис. 32. Схемы индуктивных преобразователей:

- а – с переменной площадью зазора; б – с переменной длиной зазора;*
- в – дифференциальный с переменной площадью зазора; г – дифференциальный с переменной длиной зазора;*
- д – с подвижным сердечником;*
- е – дифференциальный с подвижным сердечником*

### Емкостные преобразователи

В основу работы емкостного преобразователя положено изменение его емкости под действием входной измеряемой величины. Емкость плоского конденсатора, как известно, выражается формулой  $C = \epsilon S / \delta$ , где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;  $S$  – площадь поверхности обкладки;  $\delta$  – расстояние между обкладками, или толщина диэлектрика. Таким образом, изменение емкости преобразователя можно получить, изменяя:

- 1) расстояние между обкладками (рис. 33, а);
- 2) площадь электродов, образующих емкость (рис. 33, б);
- 3) диэлектрическую проницаемость диэлектрика (рис. 33, в).

Как видно из формулы, зависимость емкости от диэлектрической проницаемости и площади пластин имеет линейный характер, а от расстояния между пластинами – нелинейный, гиперболический характер. Если обозначить емкость, в отсутствие измеряемой величины через  $C_0$ , а в момент измерения  $C_1$ , то изменение емкости составляет:  $\Delta C = C_0 - C_1$ .

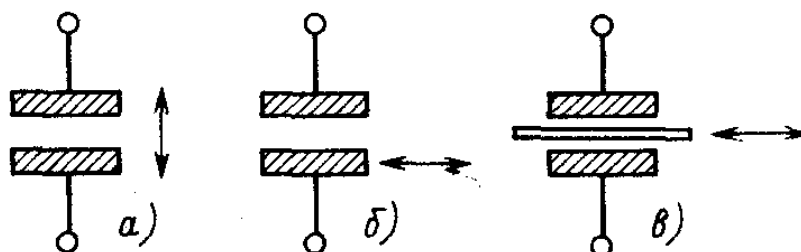


Рис. 33. Основные типы емкостных преобразователей

Емкостные преобразователи с изменяющимся воздушным зазором используют для измерения малых перемещений (от долей микрометра до долей миллиметра), для измерения силы, давления при наличии промежуточных преобразователей силы и давления в перемещение.

Преобразователи с изменяющейся площадью применяют для измерения больших линейных и угловых перемещений.

Преобразователи с изменяющейся диэлектрической проницаемостью чаще всего используют для измерения влажности твердых тел (тканей, пластмасс), сыпучих тел, аморфных (например, мазута), а также для измерения уровней, толщины изоляционных материалов, усилий. В последнем случае используется свойство сегнетоэлектриков, применяемых в качестве диэлектрика в преобразователе, изменять диэлектрическую проницаемость под действием сжимающей силы. Их применяют только для измерения сравнительно больших усилий. Достоинства емкостных преобразователей: высокая чувствительность, простота конструкции, малая инерционность.

Наряду с этим емкостным преобразователям присущи и недостатки:

- 1) большое внутреннее сопротивление, что вызывает необходимость производить питание током высокой частоты;
- 2) необходимость тщательной экранировки для уменьшения влияния внешних электрических полей и паразитных емкостей.

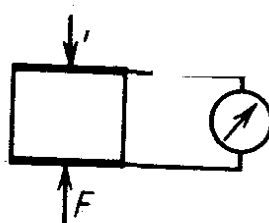
### Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи – преобразователи генераторного типа. Принцип действия их основан на явлении пьезоэлектричества, характерного для определенного класса кристаллов, не имеющих центра симметрии. Пьезоэлектрические кристаллы обладают прямым пьезоэффектом,

закрывающимся в появлении поляризации при действии давления, и обратным, заключающимся в том, что кристаллы деформируются в электрическом поле.

На использовании прямого пьезоэффекта строятся преобразователи усилий, ускорений, давлений; обратного – вибраторы, ультразвуковые излучатели и другие устройства. В пьезоэлектрических трансформаторах и преобразователях на их основе используется совместное действие прямого и обратного пьезоэффектов. В настоящее время получено большое число пьезоэлектрических материалов, которые подразделяют на две основные группы: пьезоэлектрические монокристаллы и поликристаллические материалы или пьезокерамика. Среди монокристаллических пьезоэлектриков особое место занимает кварц. Он обладает высокими значениями добротности и стабильности характеристик, Недостаток кварца – низкое значение диэлектрической проницаемости и коэффициента электромеханической связи, что ограничивает его применение в пьезоэлектрических преобразователях некоторых типов. В последнее время широкое применение находят искусственно выращиваемые монокристаллы ниобита лития, германата висмута и силиката висмута, которые имеют более высокие значения коэффициента электромеханической связи и диэлектрической проницаемости по сравнению с кварцем. Кроме того, ниобат лития обладает очень высокой температурой Кюри, а германосилиниты не имеют температуры фазового перехода, поэтому они успешно используются в условиях высоких температур.

Пьезокерамические материалы получены трех разновидностей: титанат бария, соединения ниобата свинца и соединения цирконата, титаната свинца. Пьезокерамика имеет высокие значения пьезоэлектрических характеристик. Вместе с тем пьезо-элементы из пьезокерамики дешевы в изготовлении и технологичны. Недостатки пьезокерамики – более низкие по сравнению с монокристаллами временная и температурная стабильности. Пьезоэлектрический преобразователь в обычном исполнении представляет собой пьезоэлектрическую пластинку, к электродам которой подключен вольтметр, а к граням прикладывается измеряемое усилие (рис. 34).



*Рис. 34. Пьезоэлектрический преобразователь динамических усилий*

Такие преобразователи применяют только для измерения динамических усилий и не применяют для измерения статических и медленно меняющихся нагрузок. В системах автоматики промышленных производств при-

ходится иметь дело, как правило, с медленно изменяющимися технологическими параметрами, поэтому они не нашли широкого применения в промышленности. Воздействие на преобразователь измеряемой величины осуществляется следующими способами: изменением размеров, плотности и упругих свойств самого пьезоэлемента, а также изменением акустического сопротивления (импеданса) среды, контактирующей с пьезоэлементом, которое определяется ее плотностью, скоростью звука, контактной жесткостью и площадью контакта пьезоэлемента со средой.

В зависимости от вида воздействия на преобразователь измеряемой величины существуют различные виды пьезоэлектрических преобразователей статических нагрузок.

На основе изменения размеров, плотности и упругих свойств пьезоэлемента от воздействия измеряемой величины строятся тензочувствительные, термочувствительные и масс-чувствительные преобразователи. На основе изменения акустического сопротивления среды, контактирующей с пьезоэлементом, строятся пьезоэлектрические преобразователи с изменяющимся акустическим импедансом. Выходной сигнал тензочувствительных, термочувствительных и масс-чувствительных преобразователей – изменение частоты колебаний автогенератора, в частотоподающую цепь которого включен резонатор (рис. 35).

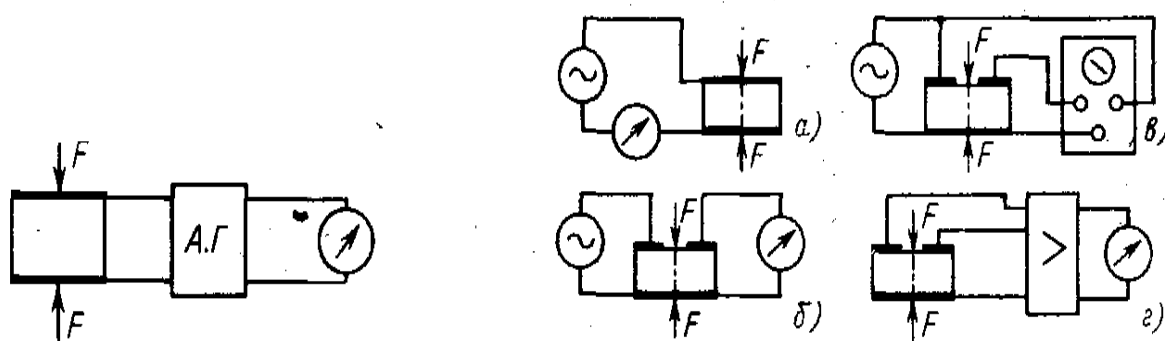


Рис. 35. Схема включения тензочувствительных пьезоэлектрических преобразователей

Пьезоэлектрические преобразователи с изменяющимся акустическим импедансом строят на основе пьезоэлектрических резонаторов и пьезоэлектрических трансформаторов. Об измеряемом усилии судят либо по изменению тока в цепи пьезорезонатора, либо по изменению выходного напряжения или сдвига фаз между входным и выходным напряжениями пьезотрансформатора. Пьезорезонаторы и пьезотрансформаторы включаются также в частотоподающую цепь автогенератора. В этом случае об измеряемом усилии судят по изменению частоты колебаний или напряжения на выходе автогенератора. Измеряемая нагрузка прикладывается либо непосредственно к пьезорезонатору или пьезотрансформатору, либо к сочлененному

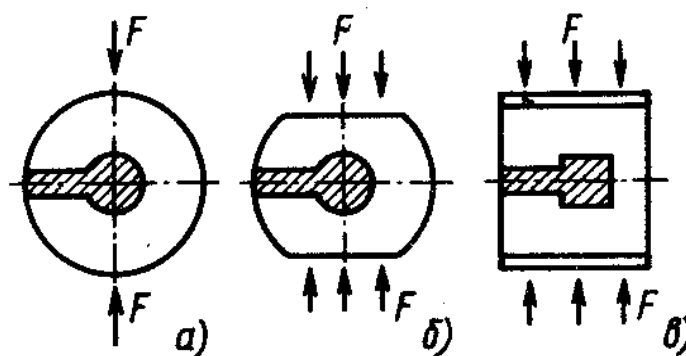
с ними акустическому чувствительному элементу. В первом случае преобразователи называют контактными преобразователями, во втором – преобразователями с акустическими чувствительными элементами.

Пьезоэлектрические преобразователи с изменяющимся акустическим импедансом применяют для измерения широкого круга механических величин, параметров жидкостей и газов, а также электрических и магнитных величин.

### *Тензочувствительные преобразователи*

Тензочувствительностью или силочувствительностью пьезоэлектрического резонатора называют зависимость его резонансной частоты от силы или деформации, определяемой силовым воздействием. Преобразователь может характеризоваться как преобразователь силы в частоту, либо как преобразователь деформации в частоту.

Изменение частоты при деформациях пьезорезонатора определяется уровнем и характером механических напряжений, поэтому более точно характеризует физическую сущность преобразования коэффициент тензочувствительности  $K_{\sigma} = \frac{\partial f}{f \partial \sigma}$ . Тензочувствительные преобразователи строятся главным образом на основе пьезорезонаторов, в которых возбуждаются колебания сдвига по толщине. Тензочувствительные преобразователи, использующие колебания сдвига по толщине, выполняют в виде прямоугольных пластин, стержней, круглых линз, в центральной части которых размещаются электроды (рис. 36).



*Рис. 36. Тензочувствительные пьезорезонаторы с возбуждением колебаний сдвига*

Толщина пьезоэлементов в зависимости от резонансной частоты выбирается 0,05-33 мм при поперечных размерах 3-30 мм. Кроме того, вклад в тензочувствительность дает также изменение упругих свойств пьезоэлемента. Изменение частоты зависит от направления прикладываемой нагрузки.



## ***Термочувствительные преобразователи***

Под термочувствительностью пьезоэлектрического резонатора понимается зависимость его резонансной частоты от температуры. Коэффициент термочувствительности можно представить, как производную от частоты по температуре

Конструктивно термочувствительные пьезорезонаторы выполняются в виде пластин или линз подобно тензочувствительным. Термочувствительность кварцевых пьезорезонаторов зависит от типа среза. Минимальную зависимость имеют кварцевые резонаторы АТ-среза, которые применяются в тензочувствительных преобразователях. Коэффициент термочувствительности увеличивается пропорционально частоте резонатора, поэтому в измерительных преобразователях используются высокочастотные резонаторы с колебаниями сдвига по толщине. Для резонаторов Y-срезов экспериментальные значения термочувствительности достигаются при углах  $\Theta \approx +5^\circ$  и  $\Theta \approx +70^\circ$ . Высокой термочувствительностью обладают резонаторы из ниобата лития при возбуждении колебаний по толщине.

## **Тепловые преобразователи**

Тепловыми называют преобразователь, принцип действия которого основан на тепловых процессах. Естественная входная величина его – температура. К таким преобразователям относятся термоэлектрические преобразователи и терморезисторы.

## ***Термоэлектрические преобразователи***

Принцип действия термоэлектрических преобразователей или термопар основан на явлении термоэлектрического эффекта, которое заключается в том, что в цепи из двух различных проводников (или полупроводников), соединенных между собой концами при разности температур соединений возникает ЭДС, называемая термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС). Такая цепь называется термоэлектрическим преобразователем или термопарой. Проводники, составляющие термопару, называются термоэлектродами, а места их соединения спаями. Рабочий конец термопары, помещенный в измеряемую среду, называют горячим спаем, а свободный (нерабочий) – холодным. Один из термоэлектродов называется термоположительным, а второй – термоотрицательным. Термоположительным называют тот проводник, от которого термоток течет в холодном спае, а термоотрицательным – тот проводник, к которому течет термоток в том же холодном спае. При небольшом перепаде температур между спаями термо-ЭДС пропорциональна разности температур. Величина термо-ЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения темпе-

ратур между спаями. Явление термоэлектричества принадлежит к числу обратных явлений. Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то в одном спаяе выделяется тепло, а на другом поглощается.

На рис. 37 изображена электрическая цепь, состоящая из двух разнородных проводников.

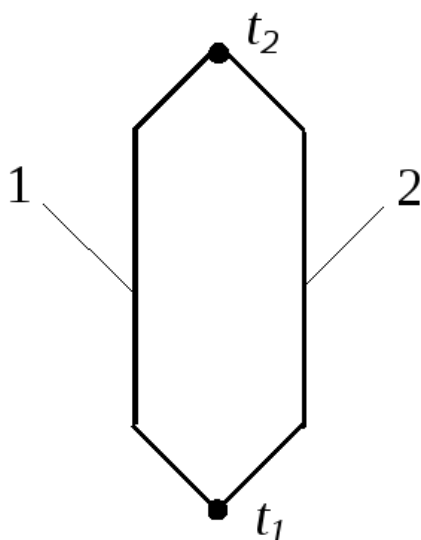


Рис. 37. Электрическая цепь термопары, где 1 и 2 – разнородные проводники;  $t_1$  и  $t_2$  – места соединений (спай)

В разнородных проводниках количество свободных электронов на единицу объема различно.

Определение зависимости ЭДС термопары ( $E_{тп}$ ) от температуры рабочего спая при заданном значении свободного спая и для выбранных материалов термоэлектродов 1 и 2 называется градуировкой термопары.

Для измерения ЭДС термопары прибор (вольтметр) устанавливают в свободном спаяе (рис. 38)

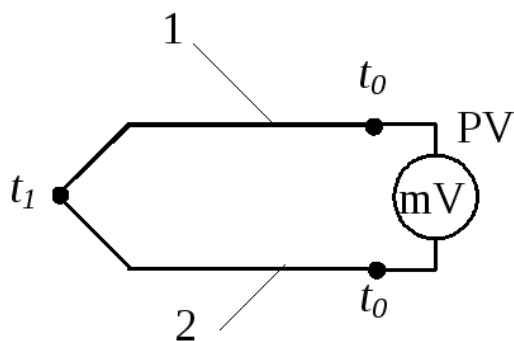


Рис. 38. Схема измерения ЭДС термопары

## ***Терморезисторы***

Терморезистор представляет собой проводник или полупроводник, сопротивление которого достаточно сильно зависит от температуры. Большинство химически чистых металлов обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления ТКС.

Для изготовления терморезисторов применяют материалы, обладающие: высокостабильным ТКС; линейной зависимостью сопротивления от температуры; инертностью к воздействию окружающей среды; хорошей воспроизводимостью свойств. К таким материалам, в первую очередь, относятся платина и медь. Применяются также вольфрам и никель. Платиновые терморезисторы применяются в диапазоне температур от  $-200^{\circ}$  до  $+650^{\circ}$  C и выше. Медные терморезисторы применяются в диапазоне температур от  $-50^{\circ}$  до  $+200^{\circ}$  C. При более высоких температурах медь окисляется.

Зависимость сопротивления от температуры платиновых терморезисторов практически линейная. Полупроводниковые терморезисторы имеют более высокую чувствительность. Температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов  $3 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}$  1/град. Он отрицателен и уменьшается пропорционально квадрату абсолютной температуры, где А и В – постоянные коэффициенты, зависящие от физических свойств проводника. Для изготовления полупроводниковых терморезисторов применяют кристаллы некоторых металлов (например, германия) и окислы титана, магния, никеля, меди и др.

## **Электрохимические преобразователи**

Электрохимический преобразователь представляет собой электролитическую ячейку, заполненную раствором, с помещенными в ней двумя или несколькими электродами, служащими для включения преобразователя в электрическую цепь. Как элемент электрической цепи электролитическая ячейка характеризуется сопротивлением, емкостью, индуктивностью, падением напряжения от проходящего тока, развиваемой ЭДС.

Выделяя зависимость одного из этих электрических параметров от измеряемой неэлектрической величины, создают электрохимические преобразователи для измерения и контроля концентрации, давления, перемещения и других неэлектрических величин.

## ***Гальванические преобразователи***

Принцип действия гальванических измерительных преобразователей основан на зависимости электродных потенциалов, т. е. гальванической ЭДС, от состава и концентрации растворов. Наиболее широкое применение они получили для измерения и контроля активности водородных ионов, по

которой определяют состав и свойства растворов.

Электропроводность воды обусловлена тем, что ее молекулы часто диссоциируют на ионы водорода  $H^+$  и ионы гидроксила  $OH^-$  :



При этом в воде и водных растворах ионное произведение воды:  $K_{H_2O} = \alpha_H + \alpha_{OH}$  является величиной постоянной, при 22 °С равной  $10^{-14}$ .

В чистой воде или нейтральном растворе активности  $H^+$  и  $OH^-$  равны  $\alpha_H = \alpha_{OH} = \sqrt{K_{H_2O}} = 10^{-7}$  г·ион/л.

В кислотном растворе больше ионов  $H^+$ , чем  $OH^-$ , но произведение их активностей остается равным ионному произведению воды  $K_{H_2O}$ . В щелочных растворах больше ионов  $OH^-$ , чем  $H^+$ . Таким образом, у кислотных растворов

$$\alpha_H > \alpha_{OH}, \text{ а у щелочных } - \alpha_{OH} > \alpha_H.$$

Следовательно, для характеристики раствора достаточно знать активность водородных ионов, которую характеризуют отрицательным логарифмом активности ионов водорода – водородным показателем pH:

$$pH = \lg \alpha_H.$$

Приборы для измерения этого называют pH-метрами.

### **Оптические преобразователи**

Оптический преобразователь содержит источник излучения – оптический канал и приемник излучения. Измеряемая величина воздействует либо непосредственно на источник излучения, изменяя его параметры, либо на поток излучения в процессе его распространения по оптическому каналу. В качестве источников оптического излучения применяют тепловые и люминесцентные источники.

### **Промежуточное тестирование**

1. Виды, схемы включения резистивных преобразователей.
2. Виды, схемы включения электромагнитных преобразователей.
3. Схема и принцип действия термоэлектрического преобразователя.

БГАРФ

## **ГЛАВА 5. Назначение, классификация и характеристики измерительных преобразователей и датчиков систем измерения и контроля содержания газов и химического состава жидкостей, систем обнаружения пожара, пламени, дыма и детекторов масла**

Газовый анализ – это анализ смесей газов, целью которого является определение их качественного и количественного состава. Газовый анализ осуществляется при помощи специальных приборов, хроматографов и газоанализаторов.

### **Хроматографы**

В газовом анализе хроматографы используются для периодического анализа продуктов горения различных видов топлива в промышленных парогенераторах, печах и других установках. Кроме того, хроматографы могут быть использованы для определения концентрации вредных примесей (СО, СН<sub>4</sub> и др.) в воздухе производственных помещений. Здесь хроматография используется для разделения газовых смесей физическими методами, основанными на распределении одного или нескольких компонентов смеси между двумя фазами. Одна из этих фаз, фиксированная на адсорбенте (поверхности твердого тела или тонкого слоя жидкости), омывается подвижной фазой (газом-носителем вместе с анализируемым газом), движущейся в свободном пространстве, не занятом неподвижной фазой. При этом происходит многократное повторение элементарных актов адсорбции и десорбции. Так как отдельные компоненты газовой смеси поглощаются, а удерживаются данным адсорбентом неодинаково, то распределение компонентов между двумя фазами, а вместе с тем и перемещение их относительно друг друга осуществляется в определенной последовательности со скоростью, характерной для каждого компонента. Это позволяет производить поочередное определение концентрации каждого компонента газовой смеси.

Хроматография газов подразделяется на газоадсорбционную и газожидкостную.

Газоадсорбционный метод разделения компонентов газовой смеси основан на различной адсорбируемости компонентов твердыми адсорбентами, представляющими собой пористые вещества с большой поверхностью. Адсорбентами, широко применяемыми в газоадсорбционной хроматографии являются активированные угли, силикагели, алюмогели, молекулярные сита (цеолиты). Используются также и другие адсорбенты, например, тонкопористые стекла.

В газожидкостной хроматографии разделение сложных смесей веществ основано на различии растворимости компонентов анализируемой смеси в тонком слое жидкости, нанесенной на поверхности твердого химически инертного носителя. Твердый носитель не участвует непосредственно

в адсорбционном процессе, а служит только для создания необходимой поверхности растворителя. Выбор жидкости (неподвижной фазы) определяется природой подлежащих разделению смеси веществ. Для разделения веществ применяют различные жидкости, например, вазелиновое масло (смесь жидких парафинов высокой чистоты), силиконовое масло (ДС-200, ДС-703) высококипящее авиационное масло, полиэтиленгликоль различных марок и др. В качестве твердых нейтральных носителей используется кирпич (инзенский – ИНЗ-600, дмитровский, апрелевский) диатомит, каолин и др.

## **Газоанализаторы**

Газоанализаторы широко применяются в различных отраслях промышленности, в медицине, науке. По принципу действия газоанализаторы бывают ручными и автоматическими. В любом случае основной метод анализа газовой смеси заключается в последовательном поглощении газов различными реагентами, однако автоматические газоанализаторы способны также определить физические или физико-химические характеристики газовой смеси и ее отдельных составляющих. Автоматические газоанализаторы в настоящее время более распространены. Большинство автоматических газоанализаторов, используемых в промышленности, являются одноканальными приборами, измеряющими один компонент. В отличие от них, например, автомобильный газоанализатор должен фиксировать концентрацию, как правило, нескольких компонентов выхлопа, в том числе, СО, СН и О<sub>2</sub>. Часто о газоанализаторах приходится слышать в контексте эксплуатации автомобиля, именно поэтому газоанализатор прочно ассоциируется с определением токсичности выхлопных газов, контроль токсичности – одна из функций газоанализатора. Многие приборостроительные предприятия разрабатывают и производят газоанализаторы и комплексные системы контроля воздуха. Использование научно-исследовательских разработок позволяет выпускать на рынок новые более совершенные модели приборов. Каждый такой прибор в обязательном порядке проходит сертификацию и проверку в органах Ростехрегулирования.

## **Датчики газового состава**

Важность анализа газового состава не вызывает сомнений, поскольку она напрямую связана с экономией энергии, сырья, контролем качества, оптимизацией промышленных процессов, охраной окружающей среды, совершенствованием медико-биологических методов.

Датчики, предназначенные для определения химического состава газовой смеси, получили широкое распространение, связанное, прежде всего, с контролем за процессами горения в целях экономии энергии и сокращения загрязнения атмосферы. Многие из новых датчиков газового состава пред-

назначены для анализа газового состава горючих смесей или продуктов сгорания:  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO_x$ ,  $CH_x$ , и т. д. Характеристики датчиков газового состава претерпевают заметную эволюцию: появляются новые датчики с более высокой селективностью, происходит их миниатюризация, приспособление к измерению непосредственно в рабочем объеме; некоторые из них способны заменить сложные и громоздкие анализаторы.

Граница между датчиками и анализаторами в случае анализа газа является расплывчатой. При ее определении используются три критерия:

- возможность оперативного использования в непрерывном или квазинепрерывном режиме для контроля газовой среды либо определения ее физических параметров (температуры, давления, скорости циркуляции, содержания пыли и т. п.);

- отсутствие необходимости в использовании химических реагентов;

- невмешательство оператора в каждое измерение (для отбора проб, поверки и т. д.).

Возможна следующая классификация датчиков газового состава:

1. электрохимические датчики на основе твердых электролитов;
2. электрические датчики;
3. катарометры;
4. парамагнитные датчики;
5. оптические датчики.

Одним из важнейших критериев, предъявляемых к датчикам, является селективность определения анализируемого газа. В связи с этим возникает вопрос о выборе варианта достижения селективности.

Изучением газовых датчиков занимается электрохимия – раздел физической химии, изучающий химические процессы, которые сопровождаются появлением электрического тока или, наоборот, возникают под действием электрического тока.

### **Электрохимические датчики**

Наиболее известный электрохимический датчик – это ионоселективный электрод. На принципе ионоселективности работают газовый потенциометрический и ферментный электроды. В них мембрана электрода покрыта слоем химического вещества, который отделен от анализируемого раствора (или газа) второй мембраной, проницаемой для определяемого вещества.

Потенциометрический газовый электрод регистрирует изменение положения равновесия химической реакции, протекающей в слое вещества на мембране электрода. В этой реакции участвует газ, диффундирующий через наружную мембрану. Когда его количество меняется, положение равновесия реакции сдвигается, и этот сдвиг регистрируется электродом. В датчике  $CO_2$  используется водородный электрод, покрытый тонким слоем бикарбо-

ната.  $\text{CO}_2$ , проникая через наружную мембрану, сдвигает положение равновесия реакции  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ , и водородный электрод измеряет концентрацию ионов водорода.

В потенциометрических ферментных электродах мембрану электрода покрывают ферментом. Разработаны потенциометрические датчики для определения аминокислот, пенициллина и других антибиотиков. В качестве ферментсодержащего слоя можно использовать бактерии, растительные и животные ткани.

### **Электрические датчики**

Полупроводниковые химические сенсоры – это электронные приборы, предназначенные для измерения концентрации контролируемых частиц в окружающей среде. Принцип действия этих приборов основан на эффекте трансформации величины адсорбции непосредственно в электрический сигнал, соответствующий количеству частиц, адсорбированных из окружающей среды или же появившихся на поверхности чувствительного слоя вследствие химической реакции. Для полупроводниковых химических сенсоров характерны низкая стоимость, малые размеры, сверхвысокая чувствительность, зачастую недостижимая для других методов анализа, надежность. Кроме того, из-за непосредственного преобразования в электрический сигнал упрощается схема измерения.

### **Оптические датчики**

В таких датчиках специфический реагент наносят на торец оптического волокна – световода. По световоду направляют луч света и регистрируют свет, пришедший от торца с нанесенным образцом. Большое количество датчиков разработано для оптического измерения уровня pH. Все они содержат иммобилизованный реагент, который может существовать в двух или более кислотно-основных формах. Если у этих форм разные спектры поглощения или флуоресценции, то, проводя измерения при разных длинах волн, можно определить их концентрацию и рассчитать pH. В отличие от стеклянного электрода, измеряющего pH в диапазоне от 1 до 14, у оптических датчиков динамический диапазон регистрируемых значений pH охватывает 1-2 единицы по обе стороны от индикатора.

Поглощение электромагнитного излучения молекулой газа может привести не только к возбуждению электрона, но также к изменениям колебательной энергии (колебания атомов относительно каждой химической связи) и вращательной энергии (вращение всей молекулы или ее части). Все эти изменения энергии являются квантованными. Возможны только определенные значения кинетического момента вращения или энергии колеба-



ний, характеризующие так называемые колебательные и вращательные энергетические уровни.

Поглощение видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений вызывает изменение электронной энергии молекул. Поглощение инфракрасного излучения приводит к изменениям колебательных и вращательных состояний молекул.

Эти эффекты используются в абсорбционной спектроскопии, которая является методом определения химического состава газа, поскольку получаемые спектры поглощения однозначно характеризуют его. Измерение интенсивности электромагнитного излучения, поглощаемого газовой смесью, зависит от природы газа и позволяет определить концентрацию данного газа в смеси.

Газы, анализ которых в промышленности осуществляется с использованием методов абсорбционной спектроскопии, приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Основные газы, анализируемые с помощью оптических излучений

Длина волны, нм	Рентгеновское излучение $10^{-2} \div 10$	УФ-излучение $10 \div 5 \times 10^2$	Видимое излучение $5 \times 10^2 \div 8 \times 10^2$	ИК-излучение $8 \times 10^2 \div 10^6$
Основные анализируемые газы	H <sub>2</sub> S, газообразные кислоты	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , Hg	Cl <sub>2</sub> , ClO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , NO, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>

Рассмотрим анализаторы с использованием видимого и ультрафиолетового излучения. Пучок света, испускаемый лампой (обычно ртутной), монохроматизируется с помощью соответствующих фильтров. В некоторых приборах монохроматическое излучение разделено на два пучка, направленных на кювету, через которую продувается смесь анализируемых газов, и на другую кювету, содержащую газ сравнения (двухлучевой спектрометр). Интенсивности излучения на выходе детектируются и сравниваются с помощью фотоэлементов.

В приборе другого типа (однолучевом спектрометре) пучок света направляется на кювету, через которую продувается смесь. После этой кюветы пучок света разделяется на два пучка, проходящие через два фильтра, один из которых дает излучение, поглощаемое анализируемым газом, а другой – не поглощаемое. Сопоставление интенсивностей этих потоков света осуществляется с помощью фотоэлементов.

## Пожарная сигнализация: классификация, типы, виды, обозначение

Система пожарной сигнализации представляет собой совокупность совместно действующих технических средств для обнаружения признаков пожара, передачи, сбора, обработки и представления информации в заданном виде пользователю. В соответствии с международной классификацией по МЭК 839-4-1-88 система пожарной сигнализации относится к системам тревожной сигнализации, предназначенным для обнаружения нескольких видов опасности. Элементами системы являются технические средства пожарной сигнализации. Обобщенная схема, характеризующая состав системы тревожной сигнализации, изображена на рис. 39.

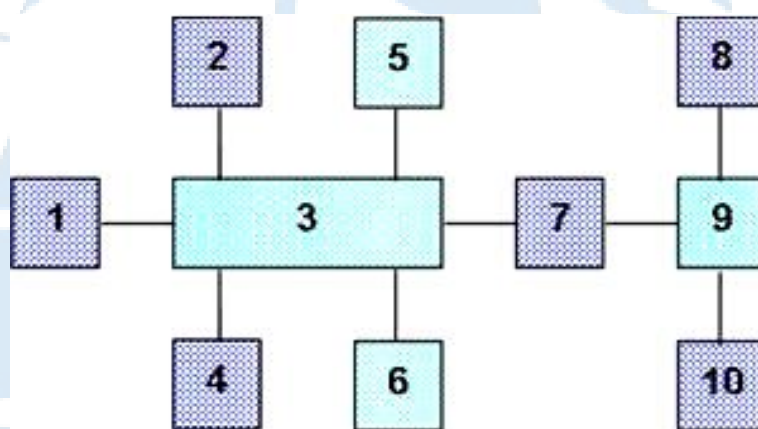


Рис. 39. Обобщенная схема системы тревожной сигнализации:  
1 – извещатель; 2, 8 – световой и (или) звуковой оповещатель; 3 – установка управления (охранно-пожарный приемно-контрольный прибор); 4, 10 – блок питания; 5 – устройство, управляемое установкой управления; 6 – программируемое входное устройство (шифрустройство); 7 – сигнальный интерфейс (система передачи извещений); 9 – установка управления (пульт централизованного наблюдения)

Для конкретной системы состав технических средств определяется способом организации охраны, а также потребностями пользователя. Обязательными элементами системы в этом случае являются извещатель, оповещатель и источник их электропитания. На практике связь между извещателем, оповещателем и системой передачи извещений на объекте всегда осуществляется через приемно-контрольный прибор пожарной сигнализации.

### Извещатели в системе охранно-пожарной сигнализации

Извещателем в системе пожарной сигнализации называется устройство, формирующее извещение при появлении пожара. В зависимости от способа приведения в действие, он может быть автоматическим или ручным

(неавтоматическим). В функции автоматического извещателя входит обнаружение факторов, сопутствующих пожару, а также воздействий, превышающих нормированный уровень, и формирование тревожного извещения.

Извещатель является конструктивно законченным устройством, выполняющим самостоятельные функции в системе сигнализации. В системе пожарной сигнализации могут использоваться как независимые пожарные извещатели, так и охранно-пожарные, совмещающие функции охранного и пожарного извещателя (например, ультразвуковой извещатель «Эхо-А»). Одной из основных составных частей извещателя является чувствительный элемент, выполняющий функции преобразователя информации и реагирующий на внешнее физическое воздействие. Если чувствительный элемент выделен и размещён в отдельной конструктивно законченной части извещателя, он называется датчиком (сенсором).

В основу классификации охранных и пожарных извещателей в соответствии с нормативными документами, а также сложившейся практикой положены следующие основные признаки (рис. 40):

- вид зоны обнаружения;
- принцип действия;
- характер охраняемого объекта;
- способ функционирования;
- способ электропитания.

### ***По способу функционирования***

Различают пассивные и активные извещатели. Активные пожарные извещатели излучают энергию электромагнитного, акустического или другого поля, и по изменению параметров принимаемого сигнала контролируется окружающее пространство. Пассивные извещатели в процессе функционирования ничего не излучают, а лишь принимают и анализируют генерируемые в контролируемой зоне сигналы, связанные обнаруживаемой угрозой.

### ***По способу электропитания***

Извещатели разделяются на питающиеся от отдельного источника питания (автономного или внешнего), а также от двухпроводного шлейфа сигнализации приёмно-контрольного прибора. В настоящее время применяемые извещатели используют оба этих способа, при этом внешним источником может являться как отдельный сетевой блок электропитания, так и встроенный в приёмно-контрольный прибор.



Рис. 40. Принципы действия охранных и охранно-пожарных извещателей

С помощью индикаторов, расположенных на приборе, на выносном табло или пульте управления, в общем случае обеспечивается световая и звуковая сигнализация:

- состояния шлейфов;
- режим работы прибора;
- наличие основного электропитания;
- наличие и неисправность резервного питания (разряд или неисправность аккумуляторной батареи).

Пожарные извещатели газовые, работающие на принципе регистрации изменения свойств полупроводников при наличии газов определённой концентрации.

Основным элементом газового извещателя является чувствительный элемент (сенсор), обеспечивающий перевод значения концентрации в атмосфере того или иного газа в электрический сигнал, который в дальнейшем анализируется блоком обработки сигналов, и при превышении установленного порога формируется извещение о пожаре.

В настоящее время в составе ИПГ используются два типа сенсоров: полупроводниковый и электрохимический.

Принцип действия полупроводниковых газовых сенсоров (термокаталитический принцип) основан на изменении сопротивления полупроводникового слоя при химической адсорбции газов на его поверхности. Слой подбирается таким образом, чтобы был селективен к определенным газам, присущим различным стадиям пожара. Для того, чтобы процессы на поверхности газочувствительного полупроводникового слоя протекали доста-

точно быстро, этот слой наносится на проводящую подложку, которая периодически разогревается до температуры 450-500 °С.

В качестве чувствительного полупроводникового слоя чаще всего используются оксиды металлов (SnO<sub>2</sub>, ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.) с легирующими добавками Pt, Pd и др. Для нагревателя в качестве подложки используется пластина, электрически изолированная от полупроводникового слоя, выполненная из Pt, RuO<sub>2</sub>, Au и др. Основное энергопотребление сенсора требуется на обеспечение нагрева подложки, что и определяет потребление извещателя на уровне 30 мА при питании 12 В.

### **Детекторы масляного тумана и системы обнаружения кислорода и других газов**



*Рис. 41. Внешний вид прибора серии Millennium*

Прибор контроля воздуха и детектор масляного тумана серии Millennium (рис. 41) представляет собой взрывозащищенный инфракрасный прибор для мониторинга окружающего воздуха на предмет наличия в нем посторонних частиц, например, дыма, масляного тумана, угля, пыли и золы. Этот уникальный прибор является ЕДИНСТВЕННЫМ в своем роде детектором, имеющим сертификат взрывозащиты класса 1 раздела 1, что делает его идеальным выбором для применения в системах на предприятиях с высоким уровнем риска. Некоторые из вариантов применения: мониторинг концентрации пыли, мониторинг аккумуляторных, двигательных помещений, компрессорных станций, мониторинг гидравлических магистралей высокого давления, контроль в точках забора воздуха систем ОВК и многое другое.

В усовершенствованной технологии сенсоров Millennium АРМ используется однолучевая ИК-лампа высокой интенсивности и отсутствуют зеркала, которые бывают подвержены загрязнению. Применение такой конструкции позволило избавиться от известных проблем с загрязнением и

низкой надежностью, характерных для традиционных детекторов тумана, работающих по принципу «открытого оптического пути», благодаря защите линзы от загрязнения и отсутствию отражателя. На рабочие характеристики сенсора также не влияет высокая скорость воздушного потока, что обеспечивает точный и надежный мониторинг в любых воздуховодах. Возможность регулировки нуля в полевых условиях и наличие нескольких уровней настройки чувствительности позволяют точно настраивать прибор в зависимости от конкретных условий применения, оптимизировать его рабочие характеристики и исключить формирование ложных аварийных сигналов.

В линейку контроллеров серии Millennium входят промышленные приборы инновационной взрывозащищенной конструкции. Микроконтроллеры приборов данной серии обеспечивают быстрое, точное и непрерывное обнаружение масляного тумана на взрывоопасных участках объектов. Поддержка аналогового сигнала 4-20 мА и наличие механических реле формы С дает возможность легко интегрировать приборы в промышленные системы обеспечения безопасности. Применение компактного контроллера с выключателем питания позволяет снизить потребность в техническом обслуживании, наличие светодиодного индикатора с прокруткой сообщений упрощает калибровку и конфигурирование, благодаря наличию разъемов для подключения измерительных приборов обеспечивается простой мониторинг токового контура и самотестирование оптической системы. Платы промышленных микроконтроллеров имеют конформное покрытие для защиты от влаги и плесневых грибов.

Прибор контроля воздуха Millennium хорошо зарекомендовал себя на опыте эксплуатации в различных странах мира. Прибор отличается превосходными рабочими характеристиками и высокой эффективностью при применении в наиболее сложных условиях окружающей среды.

Двигатель оборудован в определенных местах патрубками для отсоса из картера атмосферы (рис. 42). Масляный туман (он образовывается в картере в результате перегрева) отсасывается и передается в собирательную трубку 22. Патрубки трубки присоединены к камере 23. Затем смесь проходит через сепаратор 24, где под влиянием центробежной силы отсеиваются крупные частицы масла. Отсепарированное масло по каналам 21 поступает к насосу 20. Благодаря этому значительно уменьшается риск возможности загрязнения прибора.

Из сепаратора 24 контрольная смесь через канал 27 поступает в оптическую измерительную щель 12. Для того чтобы загрязнение в этой зоне было минимальным, особенно окошек 13 и 17 в световой камере, в обе камеры через фильтры воздуха 15 и 25 впускается незначительное количество свежего воздуха.

Через канал 18 воздушный насос 20 создает необходимое пониженное давление в отсасывающей системе. Для работы насоса подается рабочий воздух по трубопроводу 19. Выходящая из воздушного насоса смесь, состо-

ящая из атмосферы картера, рабочего воздуха и масла, может быть направлена в сборную емкость и картер. Отсепарированное масло обычно поступает в двигатель. Для проверки прибора служит блок 2.

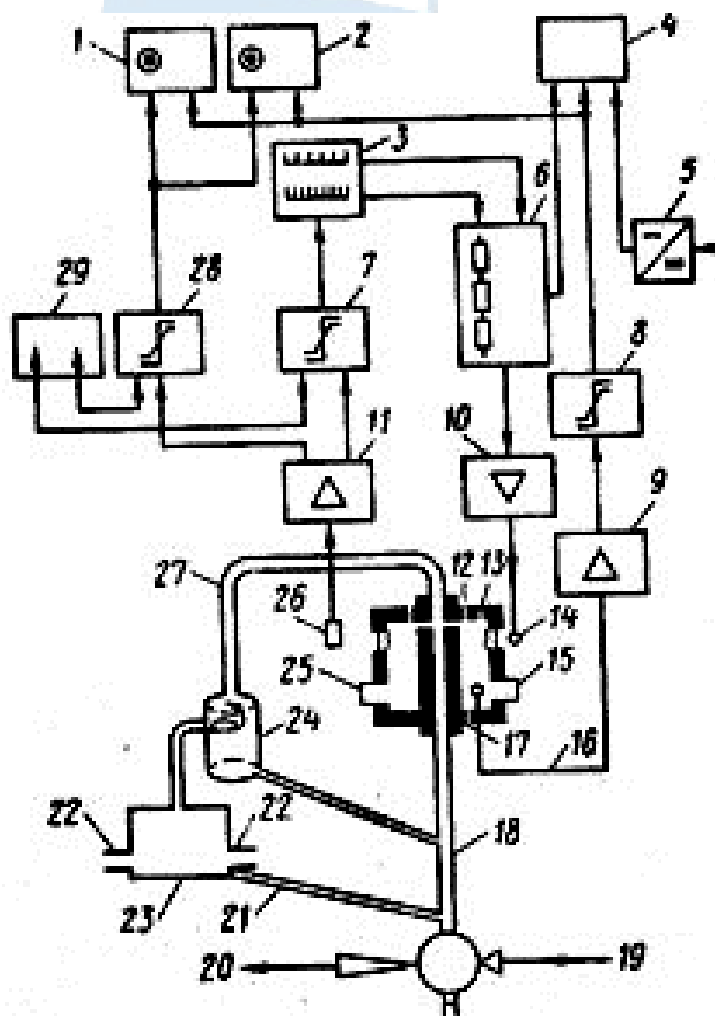


Рис. 42. Принципиальная схема детектора масляного тумана

Источник света 14 (полупроводник) излучает инфракрасный свет определенной яркости на приемник 26. Приемником света является фототранзистор, преобразовывающий световой сигнал в пропорциональный электроток, который поступает в усилитель 11.

Часть света поглощается через световую щель 12 атмосферой картера, что ведет к уменьшению электросигнала. Пороговый включатель 28 сравнивает приходящий из усилителя 11 сигнал с опорным сигналом, установленным на потенциометре 29, и управляет выходным каскадом тревоги 1. Выключатель 28 немедленно приводит его в действие, если измерительный сигнал будет меньше опорного сигнала. Это происходит в том случае, если атмосфера картера (масляный туман) имеет повышенную концентрацию масляных частиц.

### ***Особенности и преимущества:***

- сертификат класса 1 раздела 1 для применения в промышленных и взрывоопасных зонах;
- отсутствует ухудшение рабочих характеристик сенсора при изменении скорости воздуха;
- малое время отклика – типовое значение менее 2 с;
- возможность регулировки нуля и чувствительности в полевых условиях;
- для увеличения прочности в конструкции применяется конформное покрытие печатных плат электроники и корпус с защитой от осадков, что дает возможность применять прибор в наиболее жестких условиях окружающей среды в диапазоне рабочей температуры от -40 °С до +75 °С (от -40 °F до +167 °F);
- аналоговый выходной сигнал 4-20 мА с цифровым пошаговым изменением уровня, 3 механических реле формы С в стандартном исполнении;
- 8-символьный светодиодный индикатор с функцией прокрутки сообщений обеспечивает вывод подсказок и указаний в легко читаемом виде (на английском, французском и испанском языках);
- информация на ярком светодиодном дисплее и индикаторах состояния хорошо видна во всех условиях освещения;
- удобный выключатель электропитания контроллера позволяет отключать питание прибора для проведения обслуживания;
- удобная функция локального и дистанционного сброса активных аварийных сигналов;
- простое и легкое управление – возможность выполнения калибровки, конфигурирования и регулировки 1 человеком;
- прибор требует только периодического обнуления; вся процедура занимает 60 с и не требует специальных инструментов и газа;
- малая потребляемая мощность для работы с системами 12 или 24 В пост. тока;
- вынос сенсора на расстояние до 2 000 футов;
- современная технология инфракрасного оптического сенсора 2 поколения.

### ***Проверка устройств автоматического включения резервного питания***

Испытания АВР (автоматического включения резервного питания) проводятся с целью проверки его функционирования как устройства, автоматически присоединяющего резервный источник питания к потребителям I категории при исчезновении напряжения на шинах основного, вызванного любой причиной, в том числе короткими замыканиями (КЗ) на этих шинах.



## ***Нормируемые величины***

Испытания автоматического включения резервного питания проводятся перед приемкой электрооборудования в эксплуатацию, после капитальных и текущих ремонтов, а также в сроки, установленные графиком межремонтных профилактических испытаний. Проверке подлежат напряжение срабатывания и выдержка времени отключения основного ввода автоматического включения резервного питания. Выдержка времени устанавливается такой, чтобы исключить ложные срабатывания автоматического включения резервного питания при кратковременных снижениях напряжения на вводах РУ. Напряжение срабатывания и время срабатывания должны соответствовать данным завода изготовителя. Проверка функционирования реле и контакторов проводится по методике проверки правильности функционирования полностью собранных схем при различных значениях напряжения оперативного тока.

## ***Используемые приборы и оборудование***

Для испытания автоматического включения резервного питания могут быть использованы:

- комбинированный электроизмерительный прибор Ц4113 или аналогичные;
- автотрансформатор (ЛАТР), регулятор напряжения типа РНО;
- электрический секундомер ПВ 53-Л.

## ***Безопасные приёмы работ***

Работы по проверке устройств автоматического включения резервного питания выполняются по наряду-допуску или по распоряжению. Вид оформления работ определяет работник, имеющий право выдачи нарядов и распоряжений. К работе допускаются лица из электролаборатории не моложе 18 лет, обученные и аттестованные на знание ПТБ, ПЭЭБ и данной методики, обеспеченные инструментом, индивидуальными защитными средствами, спецодеждой. Состав бригады должен быть не менее двух человек:

- производитель работ с группой по электробезопасности – не ниже III;
- член бригады с группой по электробезопасности не ниже III.

Запрещается выполнять работы при высокой влажности, а также в огне-, пожаро- и во взрывоопасных средах и помещениях. Перед началом измерений необходимо изучить схему включения резервного питания электроустановки и принять меры, препятствующие допуску на испытываемый объект лиц, не участвующих в испытаниях, при необходимости выставить наблюдающего.

## *Детекторы масла*

Взрывы паров масла в картерах двигателей относятся к наиболее тяжелым аварийным повреждениям двигателей. Часто они заканчиваются трагически. К примеру, последствия взрыва в картере двигателя «Пильстик» на французском контейнеровозе представляют собой такую картину разрушения как будто в машинном отделении взорвалась бомба. Жертв не было только потому, что взрыв произошел ночью и была безвахтенная система обслуживания.

**Условия возникновения взрывов.** Взрыву паров масла в картере всегда предшествует появление там «горячей точки», что может быть вызвано ненормальной работой поршня, подшипников, валов, приводов навешенных механизмов, прорывом выхлопных газов через кольца и пр. В картере работающего двигателя всегда находится смесь воздуха и мелко распыленных частиц масла. При появлении «горячей точки» вокруг нее создается масляный туман, распространяющийся по всему объему картера. Концентрация масла в воздухе увеличивается и может достичь взрывоопасного предела, который равен 50 мг масла на 1 литр воздуха. Если в районе «горячей точки» температура смеси достигнет температуры ее воспламенения (270-400 °С), то произойдет взрыв.

**Принцип действия и назначение детектора масляного тумана.** Согласно Конвенции СОЛАС-74, на ГД мощностью 2 250 кВт и выше и диаметре цилиндра более 300 мм должны устанавливаться детекторы масляного тумана в картере двигателя или датчики температуры подшипников коленчатого вала. Применяются детекторы масляного тумана различных типов. Наиболее известные типы детекторов – «Гравинер», «Кидде», «Омнитрон». Назначение всех этих приборов одно – предотвратить взрыв паров масла в картере путем своевременной подачи сигнала о появлении взрывоопасной концентрации масляного тумана в картере и воздействия на систему управления для уменьшения нагрузки двигателя или его остановки (на современных двигателях).

В детекторах масляного тумана используется фотоэлектрический элемент, реагирующий даже на небольшое увеличение концентрации масляного тумана, который вызывает затемнение фотоэлемента, что приводит к срабатыванию АПС детектора. Прибор устанавливается в ЦПУ или у пульта управления ГД. Из каждого отсека картера к прибору подходят трубки, через которые вентилятором или эжектором засасываются пары масла из картера и направляются в камеру, контролируемую фотоэлементом. Очередность засасывания обеспечивает шаговый искатель. При увеличении концентрации масляного тумана происходит затемнение фотоэлемента и срабатывает АПС. АПС детектора срабатывает при концентрации масляного тумана 1,25-2 мг/л. Как уже указывалось, взрывоопасная концентрация

50 мг/л. Разница довольно большая, и механик вполне успеет принять необходимые меры при своевременном обнаружении сигнала АПС.

В современных детекторах засасывание паров масла из картера происходит за счет эжекции (процесс смешения двух каких-либо сред, в котором одна среда, находясь под давлением, оказывает воздействие на другую и увлекает ее в требуемом направлении). Эжектор воздушный, давление воздуха, подаваемого на эжектор, 6 кг/см<sup>2</sup>.

Исправная работа детектора – залог безаварийной работы ГД, поэтому необходимо проводить своевременно техническое обслуживание детектора согласно указаниям заводской инструкции.

### ***Мероприятия по предупреждению взрывов***

Для предотвращения взрывов паров масла при эксплуатации двигателей необходимо соблюдать следующие требования:

- Следить за состоянием ЦПГ. Не допускать работы двигателя с предельно изношенными кольцами, с трещинами в поршнях и пр.
- Следить за регулировкой двигателя, состоянием топливной аппаратуры, системы смазки и охлаждения.
- Не допускать перегрузки двигателя в целом и отдельных его цилиндров.
- Не допускать чрезмерного нагрева масла и разжижения его топливом.
- Не форсировать обкатку двигателя после ремонта.
- Не допускать установки нестандартных резиновых уплотнительных колец на цилиндрической втулке при ремонте двигателя.
- При обнаружении перегрева двигателя, а также при появлении дыма из картера необходимо снизить нагрузку двигателя. Если это не дает положительных результатов, то двигатель остановить.
- Содержать в исправном состоянии детектор масляного тумана.

### **Промежуточное тестирование**

1. Что такое газовый анализ?
2. Типы приборов для газового анализа.
3. Виды пожарных извещателей.

БГАРФ

## ГЛАВА 6. Назначение, классификация, принципы построения и характеристики элементов и функциональных узлов преобразования информации судовой автоматики

Сигнал, т. е. модуляция несущей энергии, в цепях управления испытывает множественные преобразования. Изначальное управляющее воздействие поступает в систему управления извне. Источником управляющего воздействия может быть либо команда оператора, либо изменение внешней среды или внутреннего состояния управляемой машины (механизма). В первом случае величина управляющего воздействия (нажатия на педаль или кнопку, поворота штурвала, переключения тумблера или рычага) ограничена из эргономических соображений в силу физиологических особенностей человека и не может быть значительной. Во втором случае необходимо помнить о том, что в технике получение информации – это процесс передачи энергии. Если при получении информации от контролируемого объекта (процесса) будет забрано большое количество энергии, тем самым этот объект (процесс) будет значительно искажен в процессе измерения. Следовательно, в обоих случаях управляющий сигнал на входе в систему принципиально не может обладать большой мощностью. На выходе же из системы управляющий сигнал должен обладать мощностью, соизмеримой с мощностью управляемого объекта (процесса). Поэтому у большинства систем управления сигнал при прохождении через систему должен быть увеличен по мощности в десятки и сотни раз. Помимо этого, в практике нередки случаи, когда выходной сигнал зависит не от входного напрямую, а от результатов некоторых операций с входным сигналом, т. е. сравнения его с эталонным значением, суммирования нескольких входных сигналов и так далее. В соответствии с тем, насколько разнообразны преобразования сигнала в системе, настолько разнообразны и функции отдельных элементов системы. Поэтому наиболее естественным классификационным признаком при классификации элементов систем управления является функция, которую выполняет в составе системы данный элемент, а классификация, построенная на базе этого признака, получила название **функциональной классификации элементов систем управления**. Согласно функциональной классификации, элементы систем управления делятся на следующие группы: **датчики, усилители, логические элементы, преобразователи, исполнительные устройства, органы управления и приборы контроля**.

**Датчики** – приборы, предназначенные для получения информации о состоянии объекта или процесса, преобразования ее в модуляцию того вида энергии, который циркулирует в системе управления и передачи преобразованного сигнала в систему. Физическая природа информации на входе датчика может быть любой – перемещение объекта, его скорость, температура и так далее. На выходе – модуляция энергии (как правило – электрической) в системе. Вполне понятно, что между входным и выходным сигналами

лом должно быть взаимно однозначное соответствие, пропорциональность. Как уже отмечалось выше, отбор энергии от объекта в процессе измерения должен быть незначительным. Отсюда формируются следующие три *функциональных требования к датчикам*:

- преобразование энергии в вид, удобный для передачи;
- высокая точность и однозначность преобразования;
- как можно меньшее обратное воздействие на объект.

Датчики представляют весьма многочисленный класс элементов систем управления. Они подразделяются по трем основным показателям: виду входного сигнала, способу преобразования состояния выходной цепи и характеру преобразованного сигнала. *По виду входного сигнала* датчики весьма разнообразны. В подъемно-транспортных, строительно-дорожных и путевых машинах и технологическом оборудовании применяются датчики, измеряющие изменение состояния составных частей механической энергии объекта (положение, перемещение, скорость, ускорение, усилие, давление) и температуры. *По способу преобразования состояния выходной цепи* датчики подразделяются на параметрические и генераторные.

*Параметрические датчики* изменяют какой-либо параметр (например, активное сопротивление, индуктивность, емкость) выходной цепи, по которой протекает ток от внешнего источника, пропорционально состоянию измеряемого объекта (процесса).

*Генераторные датчики* сами вырабатывают электроэнергию, величина которой пропорциональна состоянию измеряемого объекта (процесса).

*По характеру преобразованного сигнала* датчики подразделяются на аналоговые (непрерывные) и дискретные (с релейной характеристикой).

*Аналоговые датчики* обладают непрерывной выходной характеристикой, т. е. выходной сигнал их пропорционален входному во всем диапазоне изменения входного сигнала. Графически зависимость выходного сигнала  $Y$  от входного  $X$  (характеристика датчика) выражается в виде непрерывной функции (рис. 43). Отсюда второе название этих датчиков – непрерывные. Важнейшим свойством характеристики является угол  $\alpha$  ее наклона к оси  $X$ .

Тангенс этого угла  $\operatorname{tg}\alpha = \frac{dY}{dX}$  есть мера чувствительности датчика – величина его реакции  $dY$  на единичное воздействие  $dX$  на входе. По виду характеристики  $Y = F(X)$  все элементы систем управления и автоматики (в том числе и датчики) подразделяются на линейные и нелинейные.

*Дискретные датчики* обладают только двумя уровнями выходного сигнала (чаще всего «Выключено» и «Включено»). Переключение выходного сигнала с уровня на уровень происходит при достижении входным сигналом определенного значения – величины срабатывания. Графически зависимость выходной характеристики от входной представляет собой ступенчатую линию (рис. 44). Такая характеристика именуется **релейной** по названию наиболее распространенного элемента, обладающего подобной

характеристикой – реле. Подробнее о релейной характеристике и ее свойствах будет рассказано в соответствующем разделе лекций.

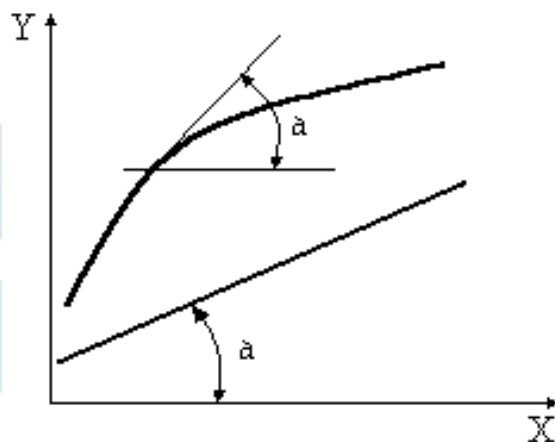


Рис. 43. Виды выходных характеристик аналогового датчика

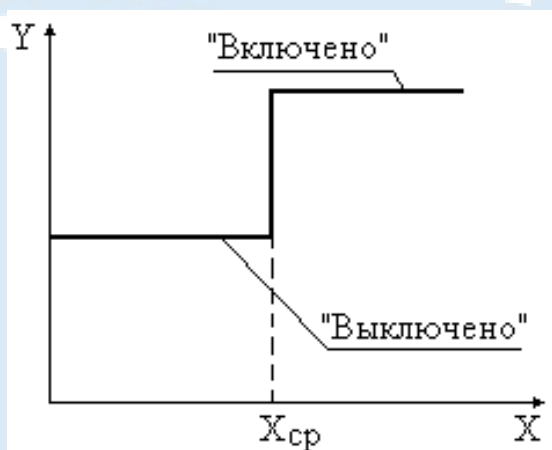


Рис. 44. Виды выходных характеристик дискретного датчика

*Примечание* к рис. 43 и рис. 44:

X – входной сигнал; Y – выходной сигнал;

X<sub>ср</sub> – величина срабатывания.

**Усилители** предназначены для усиления входного сигнала. Дополнительные их функции – очистка сигнала от помех и необходимые преобразования. Входной и выходной сигналы усилителя обладают одной физической природой. В электрических цепях управления это – модуляция потока электроэнергии. Необходимые функциональные требования:

- высокий коэффициент усиления;
- минимальное обратное воздействие на входе;
- эффективное помехоподавление.

Второе из требований обуславливается принципиально малой мощностью датчика, который традиционно устанавливается на входе усилителя.

Усилители в электрических цепях подразделяются на два вида – усилители мощности и пропорциональные.

*Пропорциональный усилитель* изменяет пропорцию между составляющими мощности входного сигнала, например, между силой тока и напряжением (трансформатор). Мощность сигнала при этом не увеличивается.

*Усилитель мощности* увеличивает мощность передаваемого сигнала за счет энергии внешнего источника питания. Принцип усиления мощности сигнала поясняется на рис. 45. Усилитель обладает двумя входами – питания и управления выходом. От входа питания к выходу через усилитель проходит энергопоток от источника питания. На вход управления подается управляющий сигнал, который модулирует силовой энергопоток. При этом амплитуда модуляции  $A$  во много раз превышает амплитуду управляющего сигнала  $a$ .

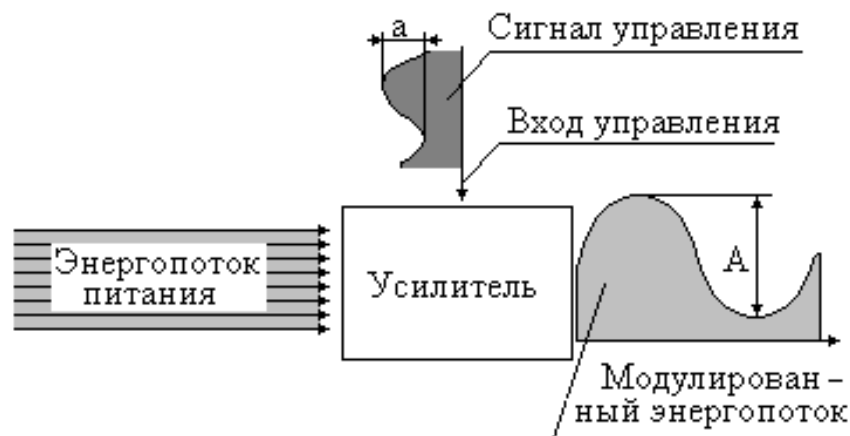


Рис. 45. Принцип работы мощности сигнала

Электрические усилители мощности подразделяются на магнитные, электронные, электромашинные.

**Логические элементы и преобразователи** предназначены для логических операций с сигналами и преобразования их. Основными логическими операциями являются: повторение (логический элемент «ДА»), отрицание или инверсия (логический элемент «НЕТ»), сложение (логический элемент «ИЛИ ДА»), умножение (логический элемент «ИЛИ НЕТ»). Основным видом преобразователей вида сигнала являются аналогово-дискретные преобразователи. Принцип преобразования сигнала аналогичен таковому у датчиков дискретного типа (смотри выше). В отличие от датчиков, у аналогово-дискретных преобразователей входной и выходной сигналы обладают одной физической природой (электрической). Разновидностью аналогово-дискретных преобразователей являются аналого-цифровые (шифраторы) и цифро-аналоговые (дешифраторы) преобразователи. Первые преобразуют

аналоговый входной сигнал в серию кодированных импульсов в двоичной системе исчисления, число и последовательность которых соответствует по специальному коду уровня входного сигнала. Дешифраторы осуществляют обратное преобразование. Основой большинства логических элементов и преобразователей являются самые распространенные элементы электроавтоматики и управления – электромагнитные и электронные реле, которые составляют особую подгруппу в данной группе устройств. Кроме преобразования по виду сигнала некоторые источники к преобразованиям относят и изменение пропорции между током и напряжением аналогового сигнала, относя таким образом пропорциональные усилители к группе преобразователей. Мы в своих Главах будем придерживаться более распространенной версии функциональной классификации, по которой пропорциональные усилители относятся к группе усилителей. Главным функциональным требованием к логическим элементам и преобразователям является высокая точность и однозначность необходимых преобразований.

**Исполнительные устройства систем управления** предназначены непосредственно для управления силовыми цепями электропривода, потоками воздуха и рабочей жидкости пневмо- и гидропривода, подвижными силовыми элементами механической трансмиссии.

Принято считать граничным элементом системы управления такой элемент, в котором реализуется поток энергии управления, циркулирующий в системе. Тогда исполнительными устройствами систем управления являются:

- для управления электроприводом – магнитные пускатели, контроллеры, тиристорные преобразователи для управления трехфазными асинхронными двигателями переменного тока с короткозамкнутыми и фазными роторами и потенциометрические преобразователи для управления двигателями постоянного тока, серводвигатели для управления дистанционными и автоматическими потенциометрами и контроллерами;

- для управления пневмо- и гидроприводом – тяговые электромагниты, управляющие пневмо- и гидрораспределителями, сервоклапанами, управляемыми клапанами;

- для управления механической трансмиссией – тяговые электромагниты, электрогидравлические и электромеханические толкатели муфт сцепления и переключения, тормозов.

Главным функциональным требованием к исполнительным устройствам систем управления является их соответствие по входным характеристикам – системе управления и выходным – управляемой силовой передаче (приводу).

**Органы управления и приборы контроля** предназначены для связи системы управления с оператором; первые для преобразования моторных действий оператора во входные сигналы системы управления, вторые для преобразования информации о состоянии системы управления и управляемого



объекта (процесса) в вид, доступный органам чувств оператора. К органам управления относятся различного рода рычаги, тумблера, штурвалы, педали, кнопки, клавиши и так далее. Приборы контроля подразделяются *по роду воздействия* на оператора – визуальные (зрение) и аудиоприборы (слух); *по виду передаваемой информации* подразделяются на приборы аналоговые (**шкальные** и **цифровые**) и дискретные (**индикаторы**). У шкальных приборов положение стрелки на шкале пропорционально уровню входного сигнала. Цифровой индикатор выдает значение уровня входного сигнала в виде цифровой информации. Индикатор выдает дискретную информацию. Наименьшим временем, необходимым оператору для оценки показаний, обладает шкальный прибор, вместе с тем точность оценки показаний у него ниже, чем у цифрового. Таким образом, шкальный прибор служит для постоянного приближенного контроля за состоянием параметра. Цифровой прибор служит для точной оценки состояния какого-либо параметра, при этом восприятие положения текущего уровня относительно пределов изменения или опасных порогов хуже, чем у приборов шкального типа. Индикатор выдает информацию о достижении контролируемым параметром определенного значения, чаще всего – предельного (например, высокой температуры жидкости в системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания). Аудиоприборы обладают, как правило, дискретным характером, аналогичным визуальному индикатору. Применяются для разгрузки зрения оператора при перегруженности визуальной информацией и для дублирования особо важных сигналов индикаторов.

**Функциональные требования к органам управления:**

- соответствие эргономическим требованиям к естественным движениям оператора по расположению, траектории, величине перемещения, усилию;
- соответствие выходных параметров входным параметрам системы управления.

**Функциональные требования к приборам контроля:**

- соответствие эргономическим требованиям к психомоторным реакциям оператора;
- соответствие входных параметров выходным параметрам системы управления.

На базе функциональной классификации элементов управления создана более обширная классификация приборов автоматики, телемеханики, телеметрии, измерения – единая **Государственная система приборов измерения и средств автоматики (ГСП)**. Так же, как и в функциональной классификации, классификационным признаком в ГСП является функция, выполняемая элементом, но здесь деление элементов на группы более дробное. Вторым отличием классификации ГСП от функциональной классификации является более широкий спектр классифицируемых приборов.

Государственная система приборов измерения и средств автоматики создана для унификации по ряду параметров как существующих, так и вновь создаваемых приборов. В структуре ГСП реализованы следующие положения:

- 1) ГСП по виду модулируемой энергии (энергии управления) должна состоять из отдельных ветвей;
- 2) должна быть универсальной;
- 3) должна обеспечивать решение задач любой потребной сложности;
- 4) построена по блочно-модульному принципу;
- 5) состоит из нормальных рядов приборов, унифицированных по виду и параметрам входных и выходных сигналов, параметрам питания и габаритным размерам.

### **Классификация элементов автоматики**

Элементы автоматики чрезвычайно разнообразны по выполняемым функциям, конструкции, принципу действия, характеристикам, физической природе преобразуемых сигналов и т. д.

1) В зависимости от того, как элементы получают энергию, необходимую для преобразования входных сигналов, они делятся на пассивные и активные.

*Пассивные элементы автоматики* – это элементы, у которых входное воздействие (сигнал  $x_{вх}$ ) преобразуется в выходное воздействие (сигнал  $x_{вых}$ ) за счёт энергии входного сигнала (например, редуктор).

*Активные элементы автоматики* для преобразования входного сигнала используют энергию от вспомогательного источника (например, двигатель, усилитель).

2) В зависимости от энергии на входе и выходе элементы автоматики подразделяются на:

- электрические;
- гидравлические;
- пневматические;
- механические;
- комбинированные.

3) По выполняемым функциям в системах регулирования и управления элементы автоматики подразделяются на:

- датчики;
- усилители;
- исполнительные устройства;
- реле;
- вычислительные элементы;
- согласующие элементы;
- вспомогательные элементы и т. д.

**Датчики** воспринимают поступающую на их вход информацию об управляемой величине объекта управления и преобразуют её в форму, удобную для дальнейшего использования в устройстве автоматического управления. Большинство датчиков преобразует входной неэлектрический сигнал  $x_{вх}$  в выходной электрический сигнал  $x_{вых}$ . В зависимости от вида входного неэлектрического сигнала  $x_{вх}$  выделяют:

- датчики механических величин (датчики перемещения, датчики скорости, датчики ускорения и т. д.);
- датчики тепловых величин (датчики температуры);
- датчики оптических величин (датчики излучения) и т. д.

Часто применяются датчики с двойным преобразованием сигнала, например, входной неэлектрический сигнал  $x_{вх}$  сначала преобразуется в перемещение, а затем перемещение преобразуется в выходной электрический сигнал  $x_{вых}$ .

Так, например, в системе автоматического регулирования высоты полёта самолёта, изменение барометрического давления, возникающее при изменении высоты полёта, преобразуется сначала в механическое перемещение центра анероидной коробки, а затем в напряжение, измеряемое с помощью потенциометра.

**Усилители** – это элементы автоматики, которые осуществляют количественное преобразование, усиление мощности входного сигнала  $x_{вх}$ . В некоторых случаях, одновременно с количественным преобразованием, усилители осуществляют и качественное преобразование (например, преобразование постоянного тока в переменный в пневматических и гидравлических усилителях осуществляется преобразование перемещения в изменение давления).

В зависимости от вида энергии, получаемой усилителем, последние делятся на:

- электрические;
- гидравлические;
- пневматические;
- электрогидравлические;
- электропневматические.

Наибольшее распространение получили электрические усилители, имеющие высокую чувствительность, большой коэффициент усиления и удобные в эксплуатации.

**Исполнительные устройства** относятся к элементам автоматики, создающим управляющие воздействия на объект управления. Они изменяют состояние или положение регулирующего органа объекта таким образом, чтобы регулируемый параметр соответствовал заданному значению. К исполнительным устройствам, создающим управляющее воздействие в виде силы или вращающего момента, относятся силовые электромагниты, электромагнитные муфты, двигатели.

Двигатели в зависимости от вида применяемой для работы энергии могут быть:

- электрическими;
- гидравлическими;
- пневматическими.

В качестве исполнительных устройств, изменяющих состояние регулирующего органа, могут использоваться усилители или реле.

**Реле** – это элементы автоматики, у которых изменение выходного сигнала ( $x_{\text{вых}}$ ) происходит дискретно (т. е. скачкообразно) при достижении входным сигналом ( $x_{\text{вх}}$ ) определённого значения, вызывающего срабатывание реле.

Это значение входного сигнала называется уровнем срабатывания реле.

Мощность входного сигнала ( $x_{\text{вх}}$ ), вызывающего срабатывание реле, значительно меньше мощности, которой реле может управлять. Поэтому реле используется и как усилительный, и как исполнительный элемент.

Реле часто используются и как автоматически управляемые коммутаторы сигналов в многоканальных системах сбора и передачи данных, в которых обрабатывается информация от десятков, сотен и даже тысяч датчиков. Они применяются также в системах контроля, сигнализации, блокировки и защиты.

**Вычислительные элементы** в устройствах автоматического управления осуществляют математические преобразования с поступающими на их вход сигналами. Эти операции осуществляются с целью обеспечения заданного алгоритма работы системы.

В простейшем случае вычислительные элементы выполняют отдельные математические операции, такие как алгебраическое суммирование, дифференцирование, интегрирование, логическое сложение, логическое умножение и т. д.

В замкнутых САУ необходимо осуществлять суммирование сигнала датчика и сигнала обратной связи. В корректирующих устройствах используется дифференцирование и интегрирование сигналов. Для выполнения этих операций главным образом используются вычислительные элементы аналогового типа.

В более сложных случаях в качестве вычислительного элемента может использоваться микропроцессор, специализированные и унифицированные ЭВМ цифрового и аналогового типов или комплекс этих машин. Такие задачи автоматического управления, как оптимизация, создание адаптивных (приспосабливающихся) САУ, использование алгоритмов управления, основанных на вероятностных и статистических методах обработки сигналов, невозможно осуществить без применения ЭВМ.

**Согласующие и вспомогательные элементы** включаются в устройство автоматического управления для улучшения его параметров, расширения функциональных возможностей основных элементов и т. д.

В качестве согласующих элементов часто используют трансформаторы, редукторы, позволяющие согласовать параметры исполнительного элемента с параметрами объекта управления.

В системах автоматического управления, в которых в качестве вычислительного элемента используются микропроцессоры ЭВМ, часто возникает необходимость согласования ЭВМ с датчиками информации и исполнительными элементами аналогового типа, широко применяемыми в автоматике. Для этой цели на входе ЭВМ устанавливаются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Аналого-цифровые преобразователи преобразуют механический сигнал (перемещения, скорости и т. д.) или электрический сигнал (напряжения, силы тока, сопротивления и т. д.), получаемый от аналоговых датчиков, в дискретный кодовый сигнал, способный восприниматься ЭВМ.

Управляющее воздействие в таких системах получают в дискретной форме как результат обработки в ЭВМ поступившей информации.

Если в устройстве автоматического управления в качестве исполнительного элемента используются электродвигатели постоянного или переменного тока, электромагнитные муфты, усилители мощности постоянного или переменного тока и т. д., то возникает потребность обратного преобразования дискретного сигнала ЭВМ в аналоговый сигнал, воспринимаемый исполнительным элементом.

Эта задача решается с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП).

Они преобразуют кодовый сигнал, полученный от ЭВМ, в перемещение, напряжение, ток, частоту и т. д.

**Вспомогательные элементы автоматики** – это стабилизаторы напряжения или тока, коммутаторы и распределители, генераторы напряжения специальной формы («пила»), формирователи импульсов, индикаторные и регистрирующие приборы, сигнальные и защитные устройства.

Эти элементы автоматики, не являясь принципиально необходимыми для работы устройства автоматического управления, в то же время позволяют увеличить точность и стабильность его работы, облегчают наладку и эксплуатацию, расширяют возможности использования этого устройства при создании САУ.

### **Промежуточное тестирование**

1. Классификация элементов систем управления.
2. Три функциональных требования к датчикам. Предназначение органов управления и контроля.
3. Классификация элементов автоматики.

## ГЛАВА 7. Назначение, классификация и характеристики усилительных элементов и устройств.

### Принципы построения и особенности структуры

Усилительные устройства могут быть классифицированы по различным признакам. Рассмотрим наиболее характерные из них. На рис. 46 приведена классификация усилительных устройств.

По характеру усиливаемого сигнала усилительные устройства делятся на усилители гармонического и импульсного сигналов.

*Усилители гармонических сигналов* предназначены для усиления сигналов, изменение которых происходит много медленнее длительностей переходных процессов в самих усилителях.

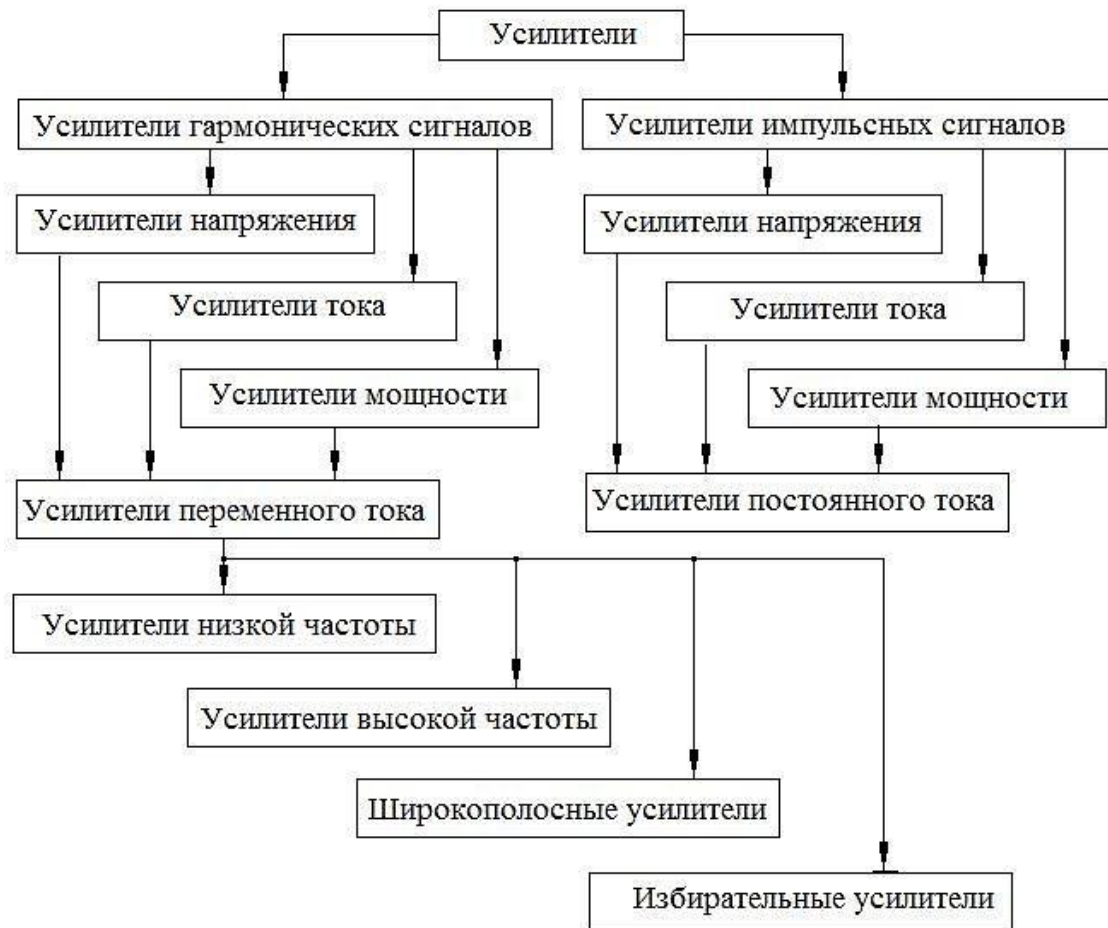


Рис. 46. Классификация усилительных устройств

*Усилители импульсных сигналов* предназначены для усиления импульсных периодических или непериодических сигналов, причем длительность собственных переходных процессов не должна вызывать искажение формы исходных импульсов.

По назначению усилительные устройства делятся на усилители напряжения, тока или мощности.

Следует заметить, что данное деление является весьма условным, так как усиление по мощности обеспечивается всеми типами усилительных устройств.

По рабочему диапазону частот усилители подразделяются на усилители постоянного и переменного тока.

**Усилителем постоянного тока** называется устройство, нижняя граница полосы пропускания которого равна нулю.

**Усилителем переменного тока** называется устройство, нижняя граница полосы пропускания которого больше нуля.

В свою очередь, усилители переменного тока делятся на усилители низкой, высокой частоты, широкополосные и избирательные усилители.

**Усилители низкой частоты** усиливают диапазон частот, слышимых ухом человека. Это примерно диапазон от 16 Гц до 20 кГц.

**Усилители высокой частоты** усиливают диапазон частот от сотен кГц до сотен мГц.

**Широкополосные усилители** работают в диапазоне от единиц Гц до сотен мГц.

**Избирательные усилители** усиливают очень узкий диапазон частот вблизи некоторой центральной частоты.

На рис. 47 приведены варианты обозначения усилителей на принципиальных электрических схемах.

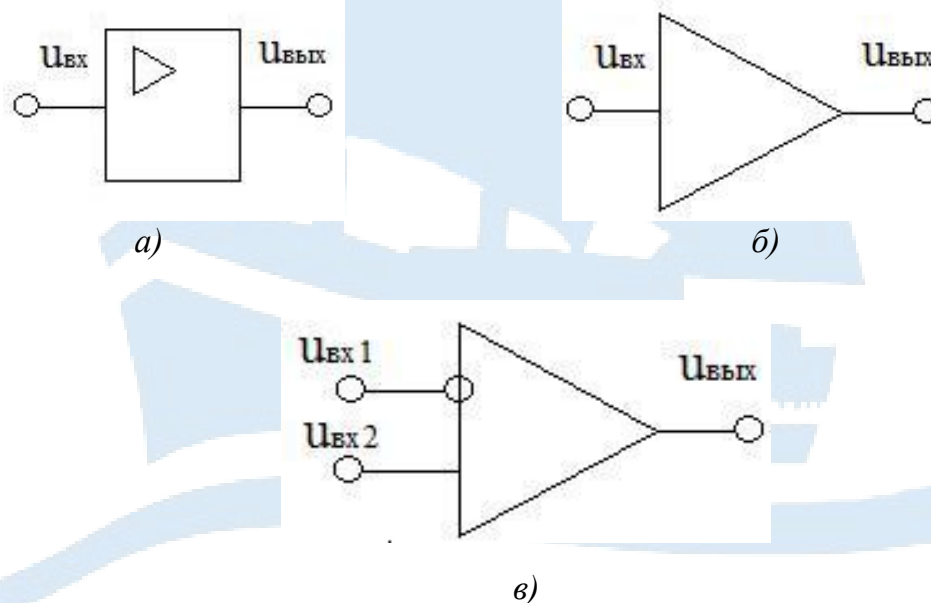


Рис. 47. Условные графические обозначения усилительного устройства

В принципе усилительные устройства могут иметь несколько входов. В качестве примера на рис. 47, в) приведено обозначение усилителя, имею-

щего два входа. Первый ( $u_{вх1}$ ) называется инвертирующим. Для него фазы входного и выходного сигналов сдвинуты на 180 градусов. Второй ( $u_{вх2}$ ) называется не инвертирующим. Для него фазы входного и выходного сигналов совпадают.

### Электронные усилители. Классификация усилителей

Усилителем называют устройство, предназначенное для повышения мощности входного сигнала без изменения его формы. Превышение мощности, выделяемой в нагрузке усилителя, над мощностью сигнала, подаваемого на его вход, осуществляется за счет энергии источника питания. Входной сигнал управляет передачей энергии от источника к нагрузке. Структурная схема электронного усилителя приведена на рис. 48. На рис. 49 приведены схемы замещения усилителя.

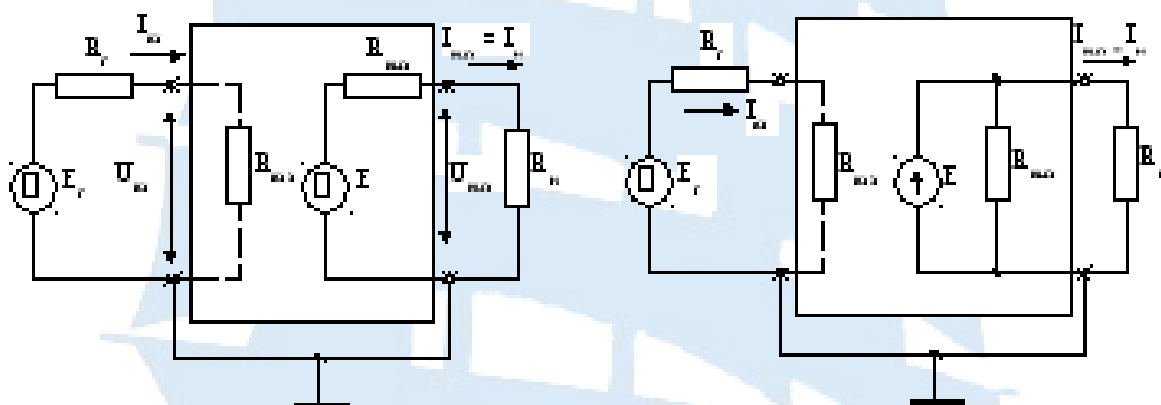


Рис. 48. Структурная схема электронного усилителя

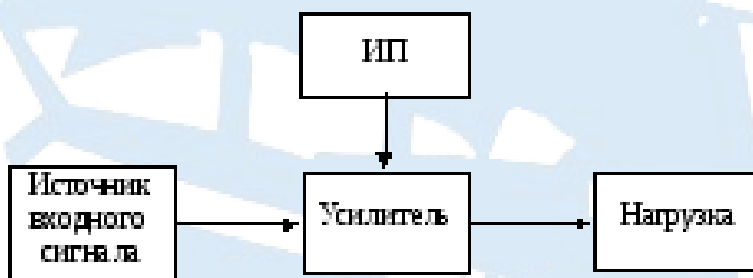


Рис. 49. Схемы замещения усилителя

Источник входного сигнала подключен параллельно входному сопротивлению  $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$ . Со стороны выхода усилитель можно представить генератором напряжения или тока с внутренним сопротивлением  $R_{вых}$ .

В зависимости от соотношения внутреннего сопротивления источника входного сигнала (генератора)  $R_r$  и входного сопротивления усилителя  $R_{вх}$ , источник входного сигнала может работать в режиме холостого хода (х.х.),



если  $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{Г}}$ , короткого замыкания (к.з.) при  $R_{\text{вх}} \ll R_{\text{Г}}$  и в режиме согласования при  $R_{\text{вх}} \approx R_{\text{Г}}$ .

По соотношению  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вх}}$  усилители подразделяются на усилители:

– с потенциальным выходом, если  $R_{\text{н}} \gg R_{\text{вх}}$ ;

– с токовым выходом, если  $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{н}}$ ;

– с мощностным выходом, при  $R_{\text{вх}} \approx R_{\text{н}}$ .

Поэтому различают усилители по напряжению, току и мощности. Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными (рис. 50).

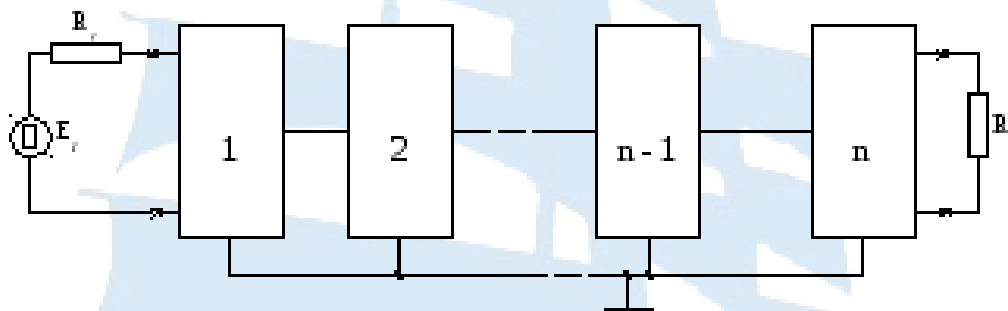


Рис. 50. Многокаскадный усилитель

Первый каскад называется входным, предпоследний (n–1) – предпоследним, последний – окончательным. Связи между каскадами различают: емкостную, трансформаторную и гальваническую.

### Классификация усилителей

Усилители различают:

1) по виду усиливаемого сигнала – усилители постоянного тока (УПТ), усилители гармонического и импульсного сигналов;

2) по виду усиливаемой величины – усилители напряжения, тока и мощности;

3) по диапазону усиливаемых частот – усилитель постоянного тока, усилители переменного тока подразделяются; усилители низких частот (УНЧ), усилители высоких частот (УВЧ), усилители СВЧ-диапазона, оптические усилители, широкополосные, узкополосные, избирательные усилители, усилители с управляемой полосой усиливаемых частот;

4) по виду соединения между каскадами в многокаскадных усилителях различают – усилители с гальванической, емкостной и трансформаторной связью. Связь по постоянному току обеспечивается только при наличии гальванической связи;

5) по виду нагрузки – усилители с активной, емкостной и индуктивной нагрузкой;

6) резонансные усилители (в процессе усиления используются резонансные системы);

7) по способу усиления – электронные, магнитные, электромашинные, оптические или квантовые, параметрические усилители.

### Основные параметры усилителей

Работа усилителя оценивается следующими параметрами:

#### 1. Коэффициент усиления

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}; K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}; K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_U K_I$$

Иногда коэффициент усиления выражают в логарифмических единицах дБ.

Учитывая, что в устройствах автоматики и связи пределы изменения мощности, напряжения и тока достаточно велики (несколько порядков), то для упрощения расчетов вводится понятие «уровень». Различают абсолютные и относительные уровни. Абсолютные уровни определяются относительно одноименных величин, принятых за единицу,  $P_0$ ,  $U_0$ ,  $I_0$ .

В соответствие с международными соглашениями (МККТТ) принято  $P_0 = 1$  мВт,  $U_0$  и  $I_0$  определяются для заданного сопротивления, например, для  $R_0 = 600$  Ом,  $I_0 = 1,29 \cdot 10^{-3}$  А,  $U_0 = 0,775$  В, при этом  $P_0 = I_0 U_0 = 1$  мВт.

Абсолютные уровни определяются как логарифм отношения,  $A_P(\text{дБ}) = 10 \lg P/P_0$ ,  $A_U(\text{дБ}) = 20 \lg U/U_0$ ,  $A_I(\text{дБ}) = 20 \lg I/I_0$ .

Если  $Z_{\text{ВХ}} = Z_{\text{ВЫХ}}$ , то относительные уровни равны разности абсолютных уровней.

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 20 \lg K_U;$$

$$K_I(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = 20 \lg K_I;$$

$$K_P(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = 20 \lg K_P.$$

Если  $Z_{\text{ВХ}} \neq Z_{\text{ВЫХ}}$ , то относительные уровни определяются с учетом неравенства этих сопротивлений.

Важнейшими параметрами усилителя являются входное и выходное сопротивления, их значения должны учитываться при согласовании усилительного устройства, как с источником сигнала, так и с нагрузкой:

$$Z_{\text{ВХ}}(\omega) = U_{\text{ВХ}}(\omega)/I_{\text{ВХ}}(\omega) \text{ при } R_{\text{H}} = \text{const};$$

$$Z_{\text{ВЫХ}}(\omega) = [\dot{U}_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}}(\omega) - \dot{U}_{\text{ВЫХ}}^{\text{H}}(\omega)] / I_{\text{ВЫХ}}^{\text{H}}(\omega),$$

где  $\dot{U}_{\text{вых}}^H(\omega)$ ,  $\dot{I}_{\text{вых}}^H(\omega)$  – напряжение и ток на выходе усилителя при подключенной нагрузке.

Часто интересуются только активными составляющими входных и выходных сопротивлений.

Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя:

$$K_0 = K_1 K_2 K_3 \dots K_n;$$

$$K_0(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ}),$$

где  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – коэффициенты усиления отдельных каскадов.

**2. Выходная мощность** усилителя – мощность, выделяемая на нагрузке с заданным коэффициентом *нелинейных искажений* усищаемого сигнала.

**3. Чувствительность** усилителя – минимальное значение входного сигнала, при котором обеспечивается номинальное значение выходной мощности.

**4. Амплитудная характеристика** усилителя – зависимость  $K_U = f(U_{\text{вх}})$  при  $f = \text{const}$  (рис. 51).

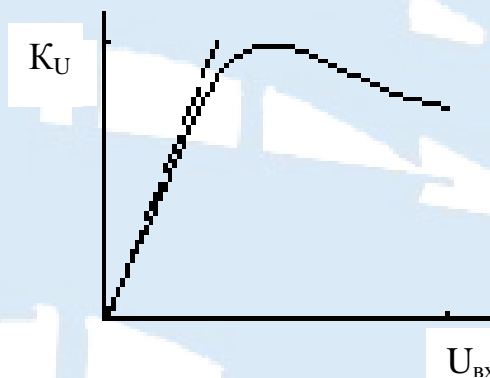


Рис. 51. Амплитудная характеристика усилителя

**5. Динамический диапазон** – отношение  $U_{\text{вх max}}$  к  $U_{\text{вх min}}$ :

$$D = \frac{U_{\text{вх.max}}}{U_{\text{вх.min}}}; \quad D(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{вх.max}}}{U_{\text{вх.min}}}.$$

Динамический диапазон обеспечивает работу усилителя на линейном участке амплитудной характеристики.

**6. Частотная характеристика** усилителя –  $K_U = F(f)$  при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$  (рис. 52).

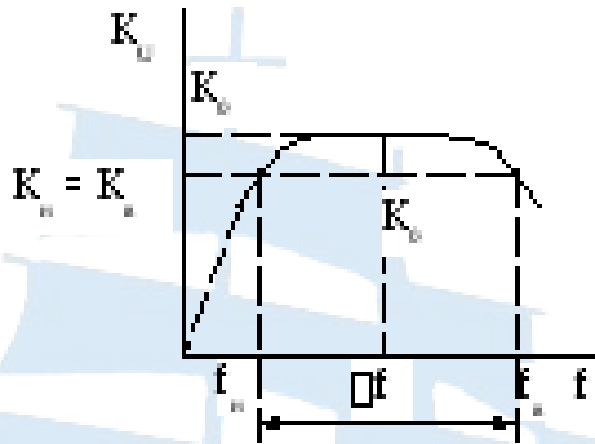


Рис. 52. Частотная характеристика усилителя

**7. Диапазон усиливаемых частот** – полоса частот  $\Delta f = f_b - f_n$ , в пределах которой коэффициент усиления не выходит за заданные пределы. Как правило, диапазон частот определяется по уровню 3 дБ или в 1,41 раза.

**8. Коэффициент частотных искажений:**

$$\mu_H = \frac{K_0}{K_H}; f_0 = \sqrt{f_H f_B}; \mu_0 = \frac{K_0}{K_B}$$

**9. Нелинейные искажения** проявляются в том, что при усилении спектрально чистого синусоидального сигнала выходной сигнал не является синусоидальным. В выходном сигнале, кроме основной гармоники, имеющей частоту входного сигнала, появляются высшие гармонические составляющие.

Для иллюстрации возникновения нелинейных искажений запишем квадратичную зависимость тока базы  $I_b$  от напряжения база-эмиттер  $U_{б-э}$ :

$$I_b = f(U_b) = A(U_{б0} + U_{вх})^2,$$

где  $A$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность проводимости.

$$A = \frac{1}{R_{вх}}; I_b = I_{б0}^2 + \Delta I_{б0} + I_{б1m} \sin \omega t + I_{б2m} \cos 2\omega t.$$

Таким образом, при аппроксимации входной характеристики квадратичной зависимостью на выходе появляются составляющие с удвоенной частотой входного сигнала. При наличии нелинейных искажений напряжение или ток первой гармоники является полезным сигналом, а все остальные составляющие – следствием нелинейных искажений.

**10. Уровень нелинейных искажений** пропорционален мощности высших гармонических составляющих и при усилении синусоидального сигнала оценивается или коэффициентом нелинейных искажений  $K_{ни}$  или коэффициентом гармоник  $K_g$ .

$$K_{\text{НИ}} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}},$$

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}.$$

**11. Линейные искажения** (частотные) обусловлены зависимостью от частоты коэффициента усиления, реактивных составляющих схемы. Уровень линейных искажений не зависит от амплитуды сигнала, а зависит только от частоты. В общем случае:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} e^{j\omega t} e^{j\phi_2(\omega)}}{U_{\text{ВХ}} e^{j\omega t} e^{j\phi_1(\omega)}} = K_U(\omega) e^{j\phi(\omega)}.$$

На практике отдельно рассматривают модуль и аргумент коэффициента усиления (АЧХ и ФЧХ).

**12. Фазовые искажения** не влияют на спектральный состав и соотношение амплитуд гармонических составляющих сложного сигнала, но вызывают изменение формы сигнала из-за фазового сдвига отдельных гармонических составляющих сигнала.

Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты.

Частотные и фазовые искажения обусловлены одними и теми же причинами и проявляются одновременно (рис. 53). Большим частотным искажениям соответствуют большие фазовые и наоборот.

Электронными усилителями называют устройства, предназначенные для усиления электрических сигналов. Усиление сигналов в устройствах осуществляется посредством активных усилительных элементов (транзисторов), преобразующих электрическую энергию источников питания в усиленные электрические колебания полезного сигнала.

Усилители различаются по назначению и принципу действия усилительного элемента. Их классификацию можно произвести по ряду показателей. Важным показателем является диапазон частот электрических колебаний, в пределах которого может удовлетворительно работать усилитель. По этому признаку различают следующие типы усилителей.

Усилители низкой частоты служат для усиления электрических колебаний в основном звуковых частот. Обычно ухо человека воспринимает как звук лишь колебания частиц воздуха с частотой от 20 до 20 000 Гц. Эти частоты называются звуковыми. Как правило, усилители звуковых частот изготавливают не на весь их диапазон, а на более узкую полосу (от  $f_n = 30-200$  Гц

до  $f_e = 3\ 000\text{--}15\ 000$  Гц), в пределах которой можно осуществить малоискаженную передачу полезного сигнала. Эти усилители имеют более простое устройство и широко используются в аппаратуре проводной связи, радиовещании и других устройствах.

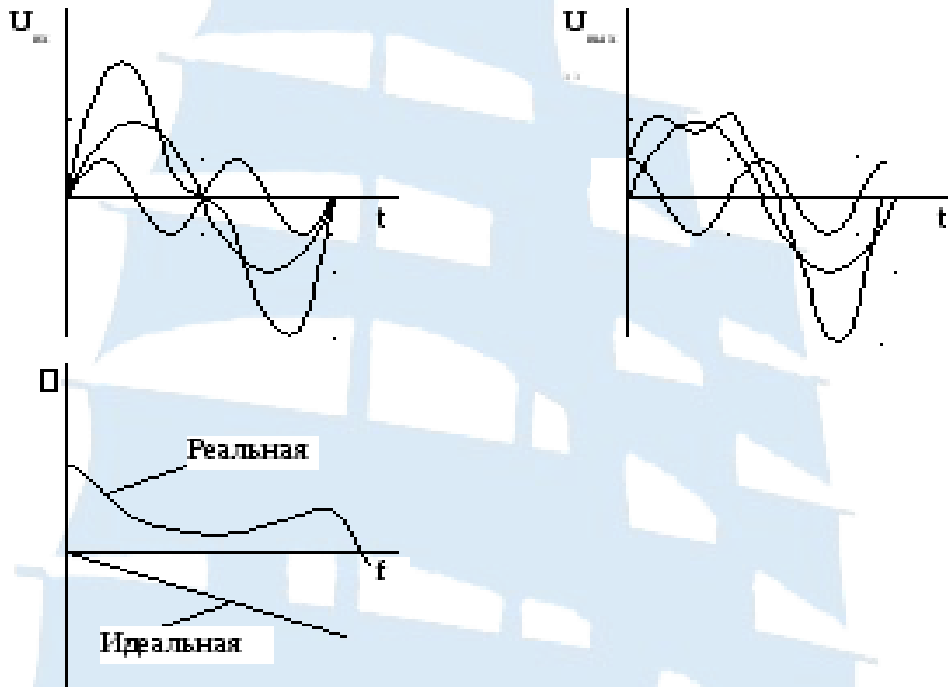


Рис. 53. Частотные и фазовые искажения

Усилители высокой частоты обычно применяют в радиоприемных и радиопередающих устройствах для усиления модулированных колебаний с несущей частотой порядка сотен килогерц и выше.

Широкополосные усилители используют для усиления сигналов в широкой полосе (от нескольких герц до нескольких мегагерц) частот в устройствах импульсной связи, телевидения, радиолокации.

Усилители постоянного тока или напряжения предназначены для усиления постоянной и переменной составляющих сигнала в диапазоне частот от  $f_n = 0$  до высшей рабочей частоты  $f_e$ , обычно составляющей несколько килогерц. Усилители применяются в автоматике, телемеханике, измерительной аппаратуре и счетно-решающих устройствах.

Усилители на транзисторах имеют почти неограниченный срок службы (десятки тысяч часов), безинерционны, обладают высокой надежностью, малой чувствительностью к ударам, вибрации, тряске. Существенными недостатками этих усилителей являются большой разброс параметров транзисторов, их большая температурная зависимость, относительно высокий уровень собственных шумов.

По назначению различают усилители тока, напряжения, мощности. Кроме того, усилители отличаются построением схемы и режимом работы усилительных элементов.

## Транзисторы

Транзисторы (Т) – полупроводниковые приборы, служащие для усиления мощности электрических сигналов. По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые (униполярные).

**Условное графическое обозначение транзисторов на схемах**

	Условное графическое обозначение биполярного транзистора структуры п-р-п
	Условное графическое обозначение биполярного транзистора структуры р-п-р
	Условное графическое обозначение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа
	Условное графическое обозначение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом р-типа
	Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным р-каналом обедненного типа
	Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным п-каналом обогащенного типа
	Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным р-каналом обогащенного типа
	Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным п-каналом обогащенного типа

*На рисунке буква  $d$  означает диаметр в мм.  $1/3d$  и  $2/3d$  соответственно треть и две трети от диаметра*

*Рис. 54. Условное графическое обозначение транзисторов на схемах*

Биполярный транзистор (БТ) – представляет собой трехслойную структуру. В зависимости от способа чередования слоев БТ называются транзисторами типа  $p - n - p$  или типа  $n - p - n$ .

Транзистор называется биполярным, если физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных электронов и дырок).

В биполярном транзисторе средний слой называется *базой* (Б), один крайний слой – *коллектором* (К), а другой крайний слой *эмиттером* (Э). Каждый слой имеет свой вывод, с помощью которых биполярный транзистор подключается в цепь. В зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим для входа и выхода, существует три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ); с общим коллектором (ОК).

Структура и условное обозначение одного из видов *полевых транзисторов* показана на рис. 55. У полевых транзисторов (ПТ) так же, как и у биполярных – три электрода, называемые *истоком*, *стоком* и *затвором*.

*Истоком* (И) называется электрод, из которого в центральную область ПТ (канал) входят основные носители заряда *n* или *p*-типов.

*Сток* (С) – электрод, через который основные носители уходят из канала.

*Затвор* (З) – электрод, управляющий потоком носителей заряда.

Поскольку в полевом транзисторе ток определяется движением носителей только одного знака *p* или *n*-типов, эти транзисторы называют также *униполярными*.

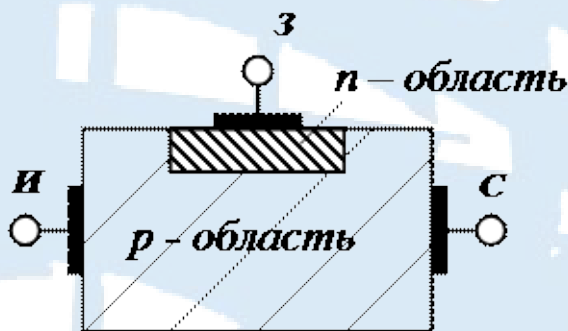


Рис. 55. Структура полевого транзистора с каналом *p*-типа

## Усилительные устройства

Усилителем в электронике называют устройство, позволяющее с помощью некоторого входного сигнала, управлять потоком энергии, передаваемым источником питания в нагрузку.

### Параметры:

#### 1) Коэффициент усиления:

а) Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}},$$



где  $\Delta U_{\text{вых}}$  – вариация выходного напряжения;  
 $\Delta U_{\text{вх}}$  – вариация входного напряжения.

б) Коэффициент усиления по току

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}}.$$

в) Коэффициент усиления по мощности

$K_p = K_u * K_i$ , причем  $K_p$  должен быть обязательно  $>1$ , иначе он уже не усилитель.

## 2) Линейность

Критерием является то, насколько искажается форма выходного синусоидального сигнала. Линейность определяется коэффициентом линейных искажений (коэффициент гармоник):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_{A1}^2}}{U_{A1}} \times 100\%.$$

В числителе – действующее значение паразитной части. В знаменателе – полезная часть.

## 3) Частота среза

$K_u$  – величина комплексная и зависит от частоты;  
 $|K_u|$  – АЧХ (рис. 56);

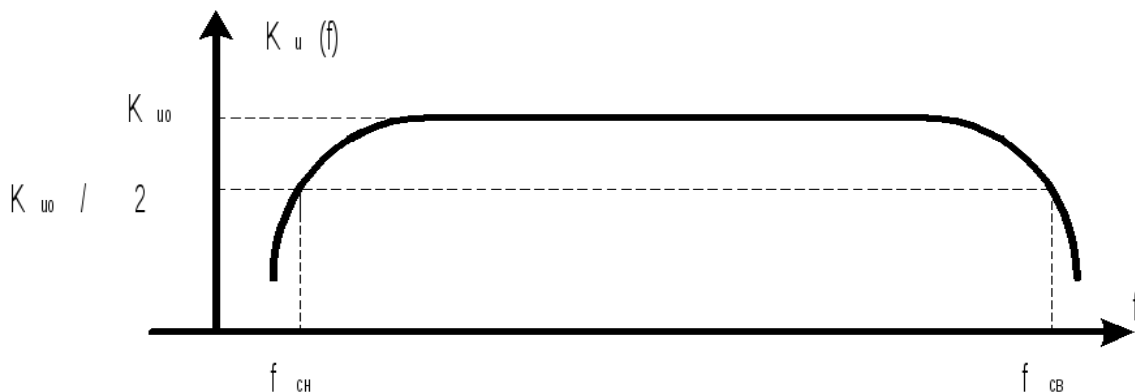


Рис. 56. Амплитудно-частотная характеристика

$f_{\text{сн}}$  – нижняя частота среза;

$f_{\text{св}}$  – верхняя частота среза.

## 4) Входной и выходной импеданс

По характеру входного и выходного сигнала

а) Усилители типа ИНУН: источник напряжения, управляемый напряжением (усилитель напряжения) (рис. 57).

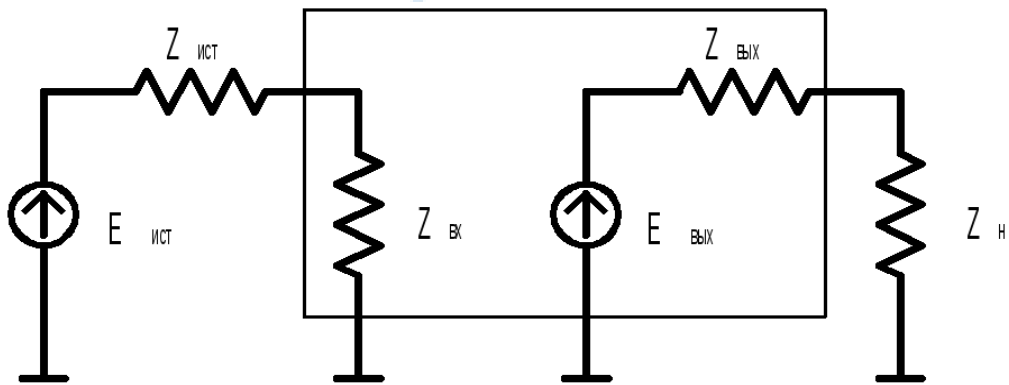


Рис. 57. Схема усилителя типа ИНУН

$$K_u = \frac{U_H}{U_{ВХ}}$$

Требования:  $|Z_{ИСТ}| \ll |Z_{ВХ}|$ , требования согласования источника сигнала с нагрузкой –  $|Z_{ВЫХ}| \ll |Z_Н|$ .

б) Входной параметр – ток, а выходной параметр – напряжение (источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)) (рис. 58).

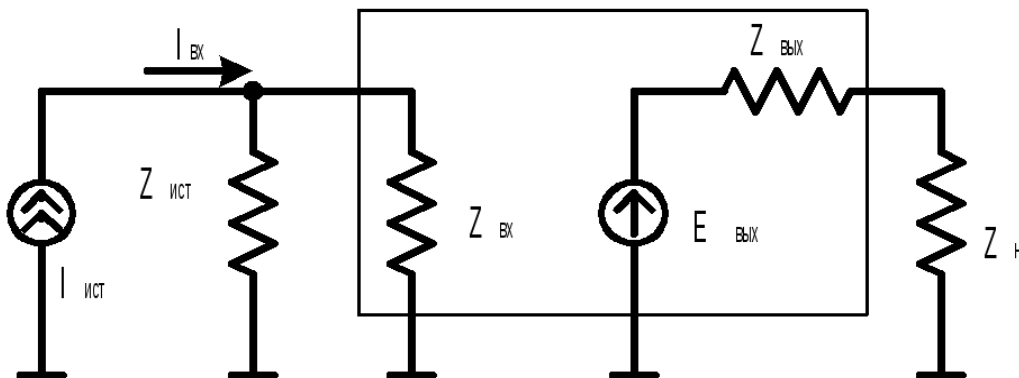


Рис. 58. Схема усилителя типа ИНУТ

Такой усилитель характеризуется передаточным импедансом:

$$Z_{пер} = \frac{U_H}{I_{ВХ}}$$

Требования согласования по входу –  $|Z_{ИСТ}| \gg |Z_{ВХ}|$ , требования согласования –  $|Z_{ВЫХ}| \ll |Z_Н|$ .

в) Входной параметр – напряжение, выходной параметр – ток (источник тока, управляемый напряжением ИГУН) (рис. 59).

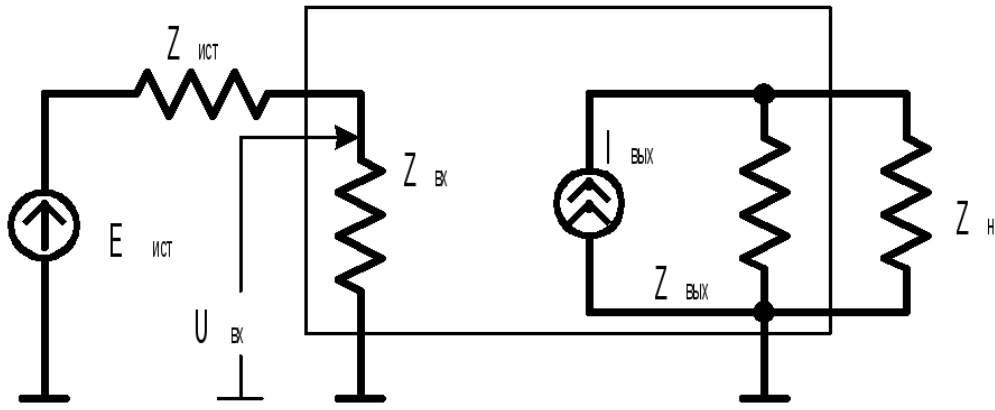


Рис. 59. Схема усилителя типа ИТУН

Характеризуется передаточным адмитансом (передаточная проводимость)

$$Y_{\text{пер}} = \frac{I_{\text{н}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Требования согласования по входу –  $|Z_{\text{ист}}| \ll |Z_{\text{вх}}|$ , согласования источника с нагрузкой –  $|Z_{\text{вых}}| \gg |Z_{\text{н}}|$ .

Иметь высокий входной и выходной импеданс.

г) Входной и выходной параметры – ток (источник тока, управляемый током ИТУТ) (рис. 60).

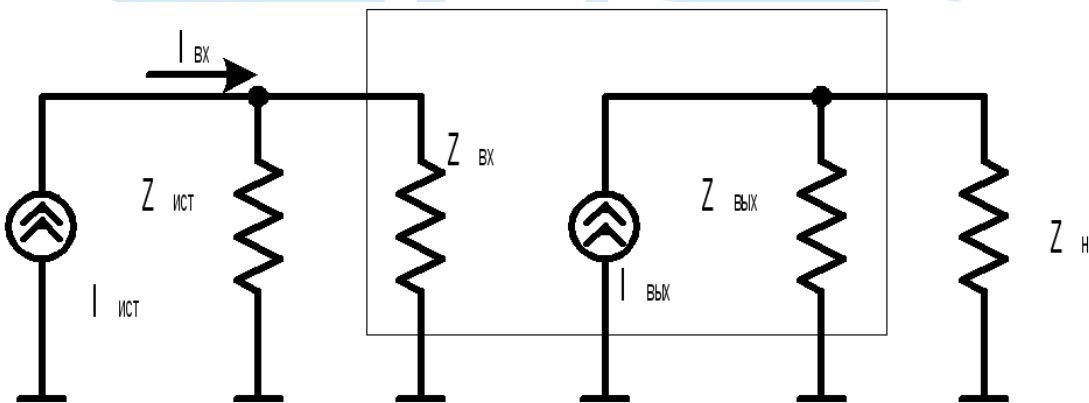


Рис. 60. Схема усилителя типа ИТУТ

Характеристика: коэффициент передачи по току

$$K_i = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{вх}}}.$$

Требования согласования по входу –  $|Z_{\text{ист}}| \gg |Z_{\text{вх}}|$ ,  $|Z_{\text{вых}}| \gg |Z_{\text{н}}|$ .

Иметь низкий входной и высокий выходной импеданс.

## Структура усилительного устройства

Усилителем электрических колебаний называется устройство, которое позволяет при наличии на его входе колебания с некоторым уровнем мощности получать на выходной нагрузке усилителя те же колебания, но с большим уровнем мощности. Эти устройства преобразуют маломощный сигнал на входе в аналоговый сигнал большей мощности на выходе. Увеличение мощности сигнала осуществляется за счёт потребления усилителем энергии от дополнительного источника – ИП.

Другим источником в устройстве является управляющий источник энергии, от которого усиливаемые сигналы поступают на усилитель. Его называют источником входного сигнала.

Устройство, являющееся потребителем усиленных сигналов, называют нагрузкой.

Электрические колебания усиливаются с помощью специальных приборов – усилительных элементов (УЭ), которые получают электрическую энергию от ИП и преобразуют ее в энергию усиливаемых сигналов, т. е. обладают управляющими свойствами.

Связь усилителя с источником входного сигнала, нагрузкой и источником питания иллюстрирует рис. 61. Усилительное устройство имеет входную и выходную сигнальные цепи, и цепи питания. Во входную цепь включен источник сигнала, от которого ко входу усилителя подводится сигнал с напряжением  $U_{ВХ}$ , током  $I_{ВХ}$  и мощностью  $P_{ВХ}$ . В выходную цепь включена нагрузка, к которой от усилителя подводится усиленный сигнал с напряжением  $U_{ВЫХ}$ , током  $I_{ВЫХ}$  и мощностью  $P_{ВЫХ}$ . Следует отметить, что при усилении возможны искажения формы сигналов, но они не должны превышать допустимых значений.



Рис. 61. Структурная схема усилительного устройства

Мощность  $P_{ВЫХ}$ , отдаваемая усилителем в нагрузку, меньше мощности  $P_0$ , потребляемой им от ИП. Это обусловлено неизбежными потерями части потребляемой мощности  $P_{П} = P_0 - P_{ВЫХ}$  в усилительных элементах и пассивных элементах (резисторах и т. д.) усилителя, приводящих к нежела-

тельному нагреву этих элементов, а также к снижению КПД усилителя, оцениваемому как  $P_{\text{ВЫХ}}/P_0$ . Вопросы снижения этих потерь (или, иначе говоря, повышения КПД усилителя) и отвода тепла очень важны, особенно в мощных усилителях и в усилителях в интегральном исполнении.

Нагрузкой усилителя могут быть – электродинамический громкоговоритель («динамик») или устройство из нескольких динамиков («колонка»), электронно-лучевая трубка (в осциллографе), головные телефоны, монитор, последующие усилители, каналы связи и т. д.

В качестве источника сигнала используют микрофоны, передающие телевизионные трубки, детекторы радиоприемников, предшествующие усилители, каналы связи, различные датчики и т. д.

В качестве усилительных элементов в усилителях телекоммуникационной аппаратуры используют преимущественно биполярные и полевые транзисторы (БТ и ПТ) в виде дискретных приборов или интегральных микросхем (ИМС),

В качестве источника питания в электронных усилителях обычно используют источник постоянного тока (выпрямитель, химический источник) с необходимыми значениями напряжения  $E_0$  и тока питания  $I_0$ .

### Принцип усиления

От источника питания (ИП) усилитель отбирает мощность  $P_0$ , необходимую для усиления входного сигнала.

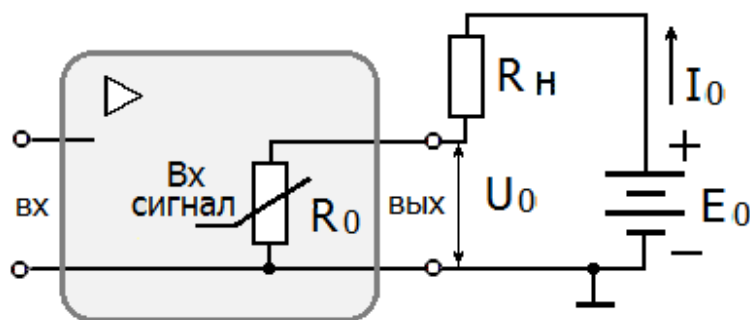


Рис. 62. Эквивалентная схема, поясняющая принцип усиления

Процесс усиления электрических сигналов по мощности является процессом преобразования мощности источника постоянного тока в мощность переменного тока, который меняется по закону изменения поданного на вход напряжения или тока усиливаемого электрического сигнала.

Работу усилительного устройства поясняет рис. 62, где изображена упрощённая эквивалентная схема выходной цепи усилителя. Один входной и один выходной зажимы усилителя имеют общую точку, которая соединена с источником питания и «заземляется». Последовательно с источником питания включены два сопротивления: постоянное сопротивление нагрузки

$R_H$  и изменяемое внутреннее сопротивление усилителя  $R_0$ , которое он оказывает постоянному току выходного электрода УЭ. Напряжение  $E_0$  делится между этими двумя сопротивлениями.

При отсутствии сигнала на входе усилителя в выходной цепи протекает ток покоя  $I_0 = E_0 / (R_0 + R_H)$ , на внутреннем сопротивлении усилителя  $R_0$  падает напряжение  $U_0$ . Под воздействием управляющего напряжения или тока, подводимого ко входу усилителя, изменяется сопротивление постоянному току  $R_0$ . Изменение этого сопротивления может осуществляться в очень широких пределах при очень малой затрате энергии на входе. При этом переменное напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H$  может быть получено во много раз больше, чем входное переменное напряжение. Общее представление о работе любого УЭ дают выходные статические характеристики. Для суждения о работе УЭ в конкретной схеме нужно начертить линию нагрузки. На рис. 63 приведены только координатные оси выходных статических характеристик, а сами характеристики не показаны, поскольку линия нагрузки не зависит от них.

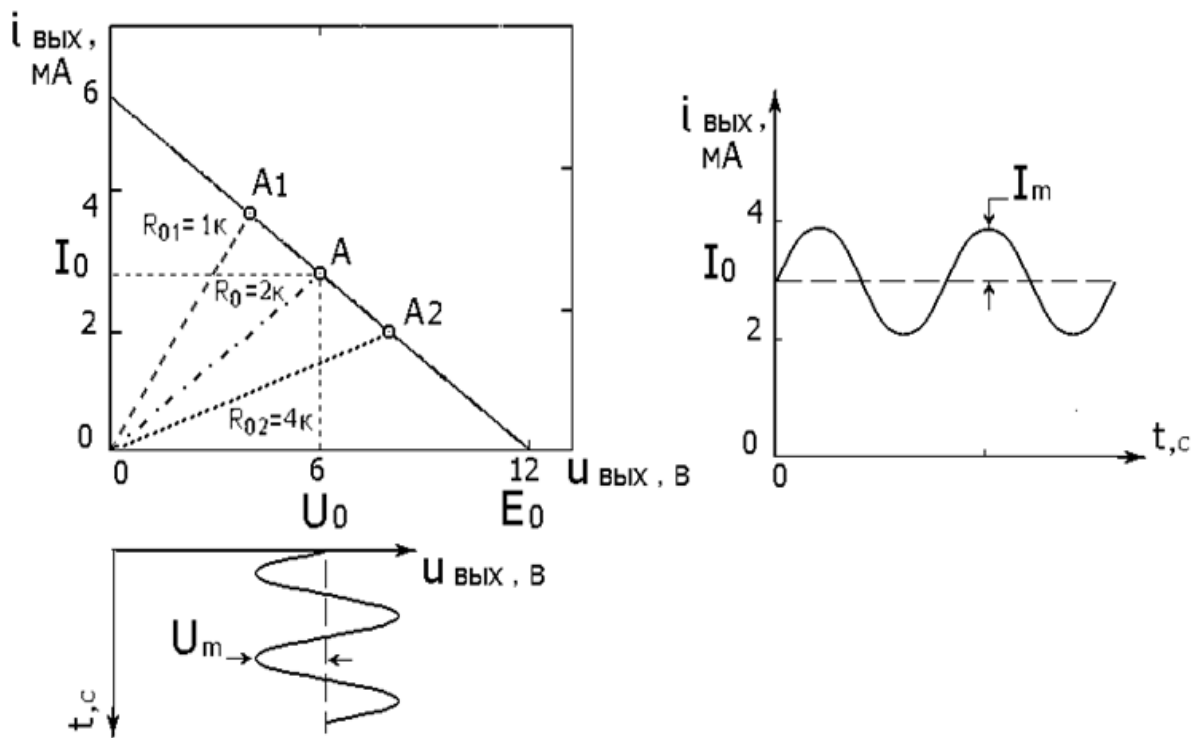


Рис. 63. Процесс преобразования энергии ИП в усиленный выходной сигнал

Линия нагрузки представляет собой траекторию, в соответствии с которой должны изменяться выходное напряжение и выходной ток при данном сопротивлении нагрузки  $R_H$  и напряжении питания  $E_0$ . Все точки нагрузочной прямой являются возможными значениями тока  $i_{\text{вых}}$  и напряжения  $u_{\text{вых}}$  внешнего сопротивления  $R_H$ . Точка А есть точка покоя (исходная рабочая точка или статическая рабочая точка), представляющая режим работы

усилителя по постоянному току, т. е. в отсутствии сигнала. В процессе воздействия сигнала на входные электроды усилителя изменяется сопротивление  $R_0$ , значения токов и напряжений на выходе УЭ изменяются, а рабочая точка занимает различные положения (например, точки А1 и А2). На рис. 63. показаны линии внутренних сопротивлений усилителя  $R_{01} = 1\text{к}$  и  $R_{02} = 4\text{к}$ , значения которых определяют координаты этих точек.

В случае гармонического входного сигнала переменная составляющая выходного тока  $I_m$  должна колебаться относительно постоянной составляющей (тока покоя)  $I_0$ , что и показано на рисунке. А выходное сопротивление УЭ должно изменяться по закону  $R_0(t) = R_0(1 + \sin\omega t)$ . Тогда полный выходной ток

$$i_{\text{вых}} = E_0 / (R_H + R_0(t)) = I_0 / (1 + n \sin\omega t),$$

где  $n = R_0 / (R_H + R_0)$ .

Справедливости ради необходимо отметить, что при идеальных статических характеристиках такие изменения приведут к уплощению нижней полуволны выходного переменного тока (правой полуволны выходного переменного напряжения  $U_m$ ), так как  $R_{02}$  будет равно  $3\text{к}$ . В реальном усилителе закон изменения  $R_0$  от входного сигнала боле сложный.

Главным отличительным признаком усилителя является его способность увеличивать мощность сигнала, получая  $P_{\text{вых}} > P_{\text{вх}}$ . Это означает, что усилитель является активным четырехполюсником.

### Промежуточное тестирование

1. Классификация усилительных элементов.
2. Параметры работы усилителя.
3. Транзистор: назначение, структура, условное обозначение.

БГАРФ

## ГЛАВА 8. Виды, назначение и классификация реле и устройств контакторного управления и защиты.

### Принцип действия и характеристики

#### Устройство и принцип работы реле

Реле представляет собой катушку, состоящую из немагнитного основания, на которое намотан провод из меди с тканевой или синтетической изоляцией, но чаще всего с диэлектрическим лаковым покрытием. Внутри катушки, установленной на нетокопроводящее основание, размещается металлический сердечник. Также в устройстве имеются пружины, якорь, соединительные элементы и пары контактов. При подаче тока на обмотку электромагнита (соленоида) сердечник притягивает якорь, который соединяется с контактом, и электрическая или электронная цепь замыкается. При снижении силы тока до определенного значения якорь, под действием пружины, возвращается на исходную позицию, вследствие чего происходит размыкание цепи. Более плавная и точная работа достигается благодаря использованию резисторов, а защиту от скачков напряжения и искрения обеспечивает установка конденсаторов. У большинства электромагнитных реле имеется не одна, а несколько пар контактов, что позволяет управлять несколькими цепями одновременно. Простейшая схема устройства электромагнитного соленоида представлена на рис. 64.

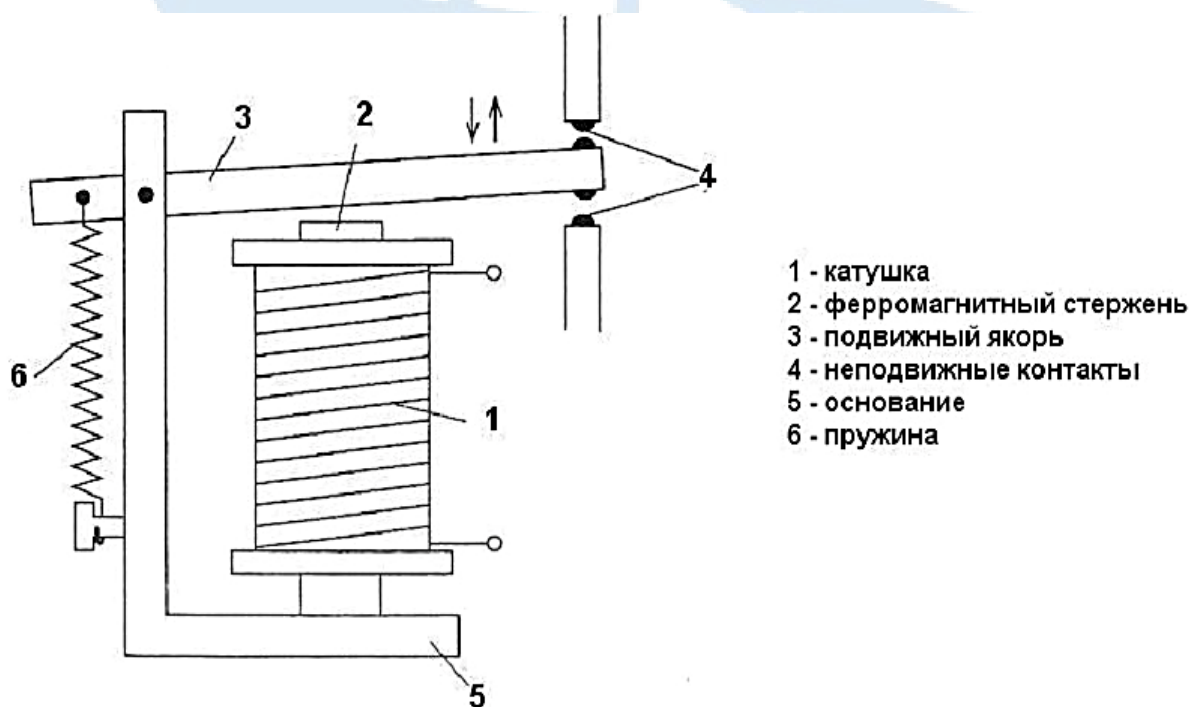


Рис. 64. Устройство реле



Если в двух словах, то этот вид коммутационного устройства работает по принципу электромагнитной индукции. Благодаря довольно простому принципу действия реле имеют высокую надежность в эксплуатации.

К основным характеристикам, на которые следует обратить внимание при выборе данного вида коммутационного устройства (КУ), относят: чувствительность – срабатывание от подаваемого на обмотку тока определенной силы, достаточной для включения устройства; сопротивление обмотки электромагнита; напряжение (ток) срабатывания – минимально допустимое значение, достаточное для переключения контактов; напряжение (ток) отпускания – значение параметра, при котором происходит отключение коммутационного устройства (КУ); время притягивания и отпускания якоря; частота срабатывания с рабочей нагрузкой на контактах.

### **Классификация и назначение реле**

Поскольку реле являются высоконадежными коммутационными устройствами, то не удивительно, что они нашли широкое применение в самых различных областях человеческой деятельности. Они используются в промышленности для автоматизации рабочих процессов, а также в быту в самой различной технике, например, в привычных всех холодильниках и стиральных машинах. Разнообразие видов реле очень велико и каждый предназначен для выполнения определенной задачи.

Реле имеют сложную классификацию и делятся на несколько групп:

- по сфере применения: управление электрическими и электронными системами; защита систем; автоматизация систем;
- по принципу действия: тепловые; электромагнитные; магнитолектрические; полупроводниковые; индукционные;
- по поступающему параметру, вызывающему срабатывание КУ: от тока; от напряжения; от мощности; от частоты;
- по принципу воздействия на управляющую часть устройства: контактные; бесконтактные.

В зависимости от вида и классификации реле применяются в бытовой технике, автомобилях, поездах, станках, вычислительной технике и т. д. Однако чаще всего этот вид коммутирующего устройства используется для управления токами большой величины. Производители настраивают современные коммутационные устройства таким образом, чтобы срабатывание происходило только при определенных условиях, например, при увеличении силы тока, поступающего на входные клеммы КУ.

**Электромагнитное реле.** Это электромеханическое коммутационное устройство, принцип действия которого основан на воздействии магнитного поля, созданного током в статичной обмотке, на якорь. Этот вид КУ разделяется собственно на электромагнитные (нейтральные) устройства, которые

реагируют лишь на значение тока, подаваемого на обмотку, и поляризованные, работа которых зависит как от токовой величины, так и от полярности.

Принцип работы электромагнитного соленоида. Используемые в промышленном оборудовании электромагнитные реле находятся на промежуточной позиции между сильноточными устройствами (магнитными пускателями, контакторами и т. д.) и слаботочным оборудованием. Наиболее часто данный вид реле применяется в цепях управления.

**Реле переменного тока.** Срабатывание этого вида реле, как видно из названия, происходит при подаче на обмотку переменного тока определенной частоты. Данное коммутирующее устройство для переменного тока с контролем перехода фазы через ноль или без такового, представляет собой блок из тиристоров, выпрямительных диодов и управляющих схем. Реле переменного тока могут быть выполнены в виде модулей на основе трансформаторной или оптической развязки. Данные КУ применяются в сетях переменного тока с максимальным напряжением 1,6 кВ и средним током нагрузки до 320 А. Иногда работа электросети и приборов не возможна без использования промежуточного реле на 220 В. Обычно КУ данного типа применяется, если необходимо замкнуть или разомкнуть разнонаправленные контакты цепи. К примеру, если используется осветительный прибор с датчиком движения, то один проводник присоединяется к сенсору, а другой подводит электроэнергию к светильнику. Реле переменного тока широко применяются в промышленном оборудовании и бытовой технике. Работает это таким образом: подача тока на первое коммутационное устройство; от контактов первого КУ ток поступает на следующее реле, которое имеет более высокие характеристики, чем у предыдущего и способно выдерживать токи с высокими значениями.

С каждым годом реле становятся эффективней и компактней. Функции малогабаритного реле переменного тока с напряжением 220 В весьма разнообразны и широко используются в качестве вспомогательного устройства в самых различных областях. Данный вид КУ применяется в тех случаях, когда основное реле не справляется со своей задачей или же при большом количестве управляемых сетей, которые уже не в состоянии обслужить головное устройство. Промежуточное коммутационное устройство применяется в промышленном и медицинском оборудовании, транспорте, холодильном оборудовании, телевизорах и прочей бытовой технике.

**Реле постоянного тока.** Реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные. Отличие между ними состоит в том, что поляризованные КУ постоянного тока чувствительны к полярности подаваемого напряжения. Якорь коммутационного устройства меняет направление движения в зависимости от полюсов питания. Нейтральные электромагнитные реле постоянного тока не зависят от полярности напряжения. Электромагнитные КУ постоянного тока в основном используют, когда нет возможности подключения к электрической сети переменного тока. К недостаткам

соленоидов постоянного тока относят необходимость использования блока питания и более высокую стоимость в сравнении с КУ переменного тока.

**Электронное реле.** Электронное реле управления в схеме прибора. Разобравшись с тем, что такое токовое реле, рассмотрим электронный тип этого устройства. Конструкция и принцип действия электронных реле практически те же, что и в электромеханических КУ. Однако для выполнения необходимых функций в электронном устройстве используется полупроводниковый диод. В современных транспортных средствах большинство функций реле и переключателей выполняют электронные релейные блоки управления и на данный момент невозможно полностью от них отказаться. Так, например, блок электронных реле позволяет контролировать расход энергии, величину напряжения на клеммах аккумуляторных батарей, управлять системой освещения и т. д.

**Электрические реле** реагируют на электрические величины – ток, напряжение, мощность, частоту, сопротивление, угол между током и напряжением или двумя токами, или двумя напряжениями.

**Механическое реле** реагируют на неэлектрические величины – давление, скорость истечения жидкости или газа, скорость вращения и т. д.

**Тепловые реле** реагируют на количество выделенного тепла или изменение температуры.

Наибольшее распространение в релейной защите и автоматике получили электрические реле.

Все реле *по назначению* условно можно разделить на три группы.

**I. Основные реле**, непосредственно реагирующие на изменение контролируемых величин, например, напряжения, мощности, частоты, сопротивления и т. д. (реле тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления).

**II. Вспомогательные реле** (реле времени, промежуточные реле).

**III. Сигнальные (указательные) реле.**

*По характеру изменения* воздействующей величины делятся на **реле максимальные** и **реле минимальные**.

*По способу включения* воспринимающего органа различаются **реле первичные**, у которых воспринимающий орган включается непосредственно в цепь защищаемого элемента, и **реле вторичные**, у которых воспринимающий орган включается через измерительные трансформаторы тока и напряжения. На рис. 65 изображены способы включения реле.

*По способу действия* исполнительного органа различаются **реле прямого действия**, у которых исполнительный орган отключает выключатель путём прямого механического воздействия, и **реле косвенного действия**, исполнительный орган которых воздействует на привод выключателя с помощью оперативного тока.

**Первичные реле прямого действия:** ( $R_{T_{max}}$ ,  $R_{H_{min}}$ , ЭТР) встраиваются непосредственно в выключатели, автоматы и магнитные пускатели.

1. **Вторичные реле прямого действия.** Реле выполняются на электромагнитном принципе и встраиваются в приводы выключателей.

2. **Вторичные реле косвенного действия:** (РТ, РН, РМ, РВ и т. д.)

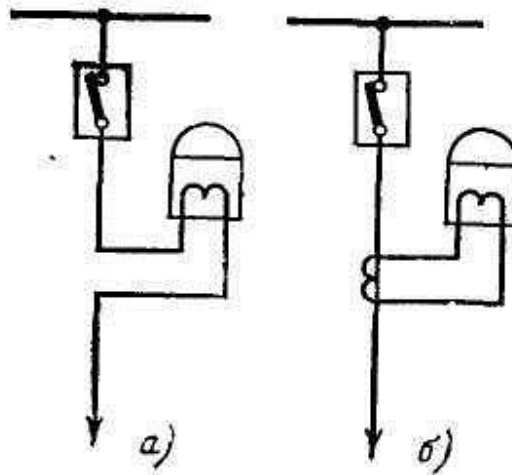


Рис. 65. Способы включения реле

По принципу действия электрические реле разделяются на следующие группы:

- электромагнитные реле,
- поляризованные реле
- магнитоэлектрические реле,
- индукционные реле,
- полупроводниковые реле.

Основным аппаратом, производящим замыкание и размыкание главных цепей двигателя при автоматическом управлении, является электромагнитный контактор, представляющий собой выключатель, включаемый и выключаемый при помощи электромагнита. Контакторы обычно применяют одновременно с различными реле, например, реле тока, напряжения и др. Контакты реле включают в цепь электромагнитов, что дает возможность производить включение и выключение силовых цепей с током от 10 до нескольких сотен ампер и напряжением до нескольких сотен вольт. Контакторы выполняют как для постоянного, так и для переменного тока, и они могут быть одно- и многополюсными. Контакторы постоянного тока имеют обмотку, питающуюся постоянным током напряжением ПУ или 220 В и потребляют мощность 20-30 Вт. Обмотки контакторов переменного тока питаются переменным напряжением 127, 220 или 380 В и служат для коммутации цепей переменного тока.

Для автоматического пуска и остановки двигателей применяют магнитные пускатели.

## Электромагнитные контакторы

На рис. 66 схематически изображен однополюсный контактор; он состоит из стального сердечника 1, на который надета катушка 2.

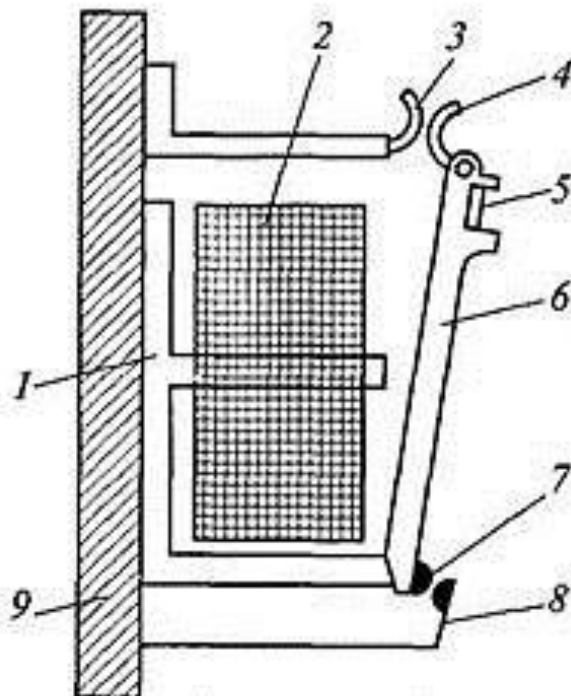


Рис. 66. Схема однополюсного контактора:

1 – сердечник; 2 – катушка; 3, 4 – контакты соответственно неподвижный и подвижный; 5 – пружина; 6 – якорь; 7, 8 – блок-контакты; 9 – изолирующая основа

При включении тока в катушке якорь (6) притягивается к сердечнику и замыкает главные линейные притирающиеся контакты: (3) – неподвижный и (4) – подвижный. Пружина (5) обеспечивает надежность прикосновения контактов. Вспомогательные блок-контакты (7; 8) служат для цепей обмоток других контакторов, реле и цепей сигнализации. Число вспомогательных контактов может быть различно, причем они могут быть размыкающими или замыкающими.

При выключении катушки якорь под действием собственного веса (при вертикальном расположении контактора) отпадает и выключает цепь тока; одновременно размыкаются контакты (7; 8). Включение контакторов может осуществляться специальными замыкателями. Все детали контактора монтируются на изолирующей основе (9). Выбор контакторов производится исходя из напряжения в цепи главных контактов и блок-контактов, а также значения и длительности протекания тока нагрузки. Эти данные приводятся в каталогах и справочниках.

## Схемы блокировки и взаимной блокировки реле

На рис. 67 изображены типовые релейные схемы, наиболее часто встречающиеся в устройствах автоматики.

*Схема экономичного включения реле* (см. рис. 67, а). При срабатывании реле Р его собственные блок-контакты (БК) размыкаются и в цепь обмотки включается добавочное сопротивление  $R_a$ , которое до срабатывания реле было замкнуто накоротко замыкающим контактом. При этом ток в цепи резко уменьшается, что делает схему экономичной, так как в этом случае уменьшаются потери энергии в цепи обмотки, а следовательно, и ее нагрев. Уменьшение тока объясняется тем, что для удержания якоря в притянутом положении требуется значительно меньший ток в обмотке реле, чем ток срабатывания. Поэтому если реле должно находиться долго в притянутом состоянии, то выгодно после его срабатывания уменьшить значение тока в обмотке до минимального, необходимого для удержания якоря.

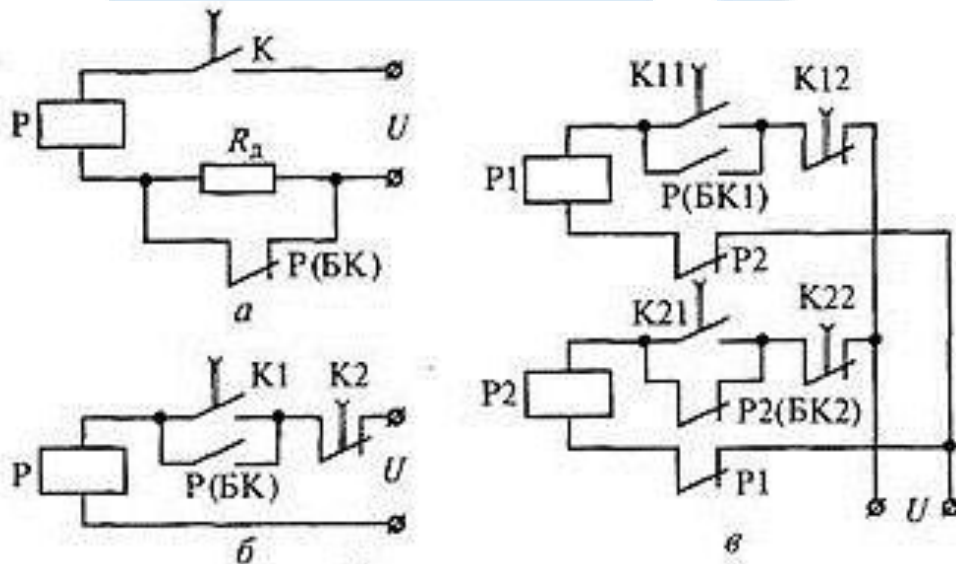


Рис. 67. Схемы экономичного включения реле (а), самоблокировки реле (б) и взаимной блокировки двух реле (в)

*Схема самоблокировки реле* (см. рис. 67, б). При нажатии кнопки К1 реле Р срабатывает и своим замыкающим контактом шунтирует кнопку К1; поэтому при отпускании кнопки К1 цепь обмотки реле остается замкнутой.

Для повышения экономичности схемы можно последовательно с контактом реле включить добавочное сопротивление. Для отключения реле достаточно нажать кнопку К2, при этом обмотка реле обесточится и его контакты, шунтирующие кнопку К1, разомкнутся. Эта схема нашла применение при кнопочном управлении каким-либо устройством.

*Схема взаимной блокировки двух реле* (см. рис. 67, в). Эта схема не допускает одновременного включения двух реле, что достигается введением в

цепь обмотки одного из них размыкающих контактов другого. Обозначение каждого контакта показывает, какому реле этот контакт принадлежит. Например, если время срабатывания реле Р1 меньше, чем время срабатывания реле Р2, то при одновременном нажатии двух кнопок К11 и К21 срабатывает только реле Р1 и своими контактами размыкает цепь обмотки реле Р2. Если же одновременно срабатывают реле Р1 и Р2, то это приводит к выходу системы из строя (например, если одно реле служит для включения вращения двигателя в одном направлении, а другое реле – в другом).

### Магнитные пускатели

Существует много видов автоматических схем управления электрическими двигателями, пуск и остановка которых осуществляются при помощи кнопок. Такие схемы выполняются в виде отдельных устройств, называемых магнитными пускателями. Магнитный пускатель – это один из видов контакторов, предназначенный для пуска трехфазных асинхронных двигателей.

На рис. 68, а изображена схема управления электрическим двигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором с помощью *неревверсивного магнитного пускателя*.

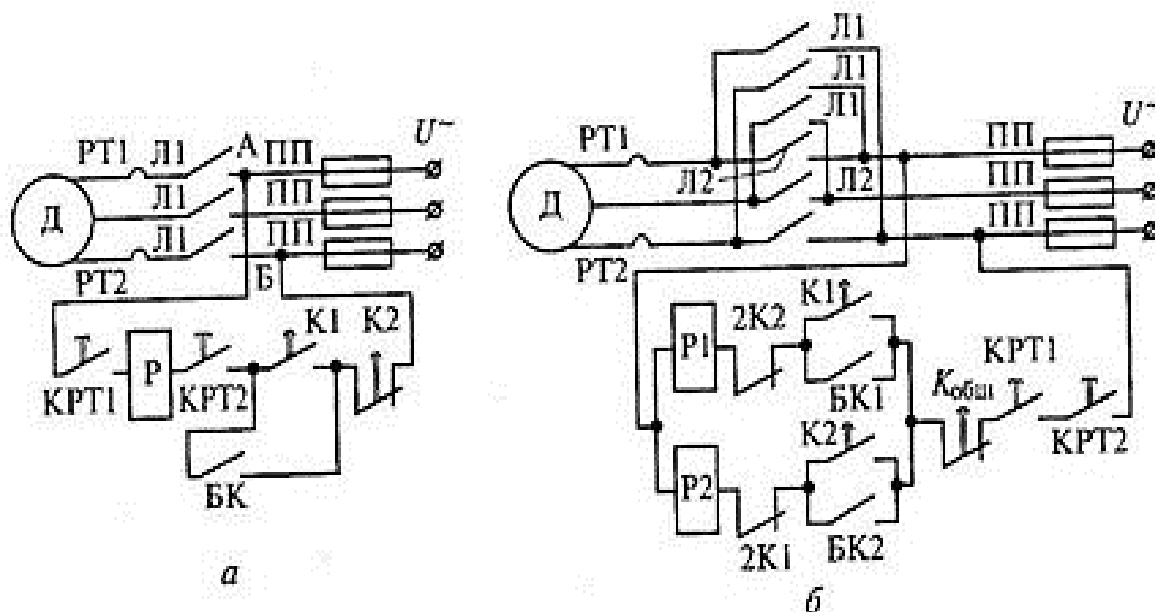


Рис. 68. Схемы магнитных пускателей для управления электродвигателями:  
а – неревверсивная; б – реверсивная

Эта схема состоит из контактора с тремя главными линейными контактами Л1, одного блок-контакта Б К, служащего для его самоблокировки после срабатывания при нажатии кнопки К1 (Пуск), и двух биметаллических тепловых реле РТ1 и РТ2 для защиты двигателя от перегрузки. Схема работает таким образом. Цепь управления присоединяется к цепи главного

тока перед главными контактами пускателя (точки А и Б), в противном случае при отключенном контакторе цепь управления осталась бы без напряжения. При нажатии кнопки К1 (Пуск) образуется цепь: фаза А – контакт теплового реле КРТ1 – втягивающая катушка контактора Р – контакт теплового реле КРТ2 – нажатая кнопка К1 – замкнутая кнопка К2 (Стоп) – фаза Б.

Если через катушку контактора пропустить ток, то она замыкает главные контакты и замыкающий блок-контакт БК. В результате электродвигатель Д, присоединенный к сети, начинает вращаться. При замыкании блок-контакта БК пусковая кнопка К1 шунтируется и может быть отпущена, так как ток в катушку Р проходит теперь через блок-контакт БК. При нажатии кнопки К2 (Стоп) цепь катушки обесточивается, поэтому размыкаются главные линейные контакты Л1 и блок-контакт БК, а электродвигатель останавливается. Тот же эффект достигается при отключении напряжения в цепи главного тока при снижении его до 65 % от номинального. Теперь магнитный пускатель самопроизвольно включиться не может, так как цепь катушки Р разомкнута контактами К1 и БК. Поэтому повторная подача напряжения в цепь главного тока не вызывает включения электродвигателя до тех пор, пока не будет вновь нажата кнопка К1 (Пуск). Таким образом, обеспечивается так называемая «нулевая защита».

Тепловые реле РТ1 и РТ2 включены в цепь главного тока, и через них проходит весь ток электродвигателя. Эти реле имеют размыкающие контакты КРТ1 и КРТ2, включенные последовательно с катушкой Р. При нормальной нагрузке двигателя контакты реле КРТ1 и КРТ2 замкнуты. При перегрузке двигателя одно или два реле (РТ1, РТ2) размыкают свои контакты КРТ1 и КРТ2, что вызывает обесточивание цепи катушки Р. Контакты Л1 и БК размыкаются, и электродвигатель останавливается. Дальнейший принцип работы теплового реле описан ранее. Так как тепловые реле обладают большой тепловой инерцией, то они не могут защитить электродвигатель при коротких замыканиях. Поэтому включение плавких предохранителей ПП необходимо даже при наличии тепловых реле.

При частом реверсировании двигателя применяется *реверсивный магнитный пускатель*. Реверсивная схема собирается по принципу схемы самоблокировки (см. рис. 68, б).

При включении первого магнитного пускателя электродвигатель Д вращается в одном направлении, а при выключении первого пускателя и включении второго – в обратном.

Одновременное включение обоих пускателей недопустимо, так как это может привести к короткому замыканию в цепи главного тока. Чтобы предотвратить включение второго пускателя, когда уже включен первый, в цепь катушки Р2 второго пускателя включают размыкающий контакт 2К1 первого пускателя, и наоборот. Поэтому при включении первого пускателя его контакт 2К1 размыкается и нажатие кнопки К2 не приводит к включению второго пускателя.



Для реверсирования двигателя необходимо сначала отключить работающий двигатель, а затем пустить его в обратном направлении. В схеме предусматривается только одна кнопка «Стоп» –  $K_{\text{общ}}$ , включенная в неразветвленную часть цепи, куда включены контакты тепловых реле КРТ1 и КРТ2.

### Автоматические выключатели

Автоматические выключатели (автоматы), как правило, предназначены для отключения поврежденного участка сети при возникновении в нем аварийного режима (короткого замыкания, тока перегрузки, пониженного напряжения). Термическое и электродинамическое (при коротком замыкании) воздействия повышенных токов могут привести к выходу из строя электрооборудования. В условиях пониженного напряжения, если механический момент нагрузки на валу остается неизменным, через работающие двигатели также будет протекать повышенный ток.

Автомат, в отличие от контактора, имеет узел элементов защиты, автоматически обнаруживающий появление в сети ненормальных условий и дающий сигнал на отключение.

Различают несколько типов автоматов: *универсальные* (работают на постоянном и переменном токе), *установочные* (предназначаются для установки в общедоступных помещениях и выполняются по типу установочных изделий), *быстродействующие* постоянного тока и *гашения магнитного поля* мощных генераторов.

На рис. 69 дана условная конструктивная схема универсального автомата в упрощенном изображении. Автомат коммутирует электрическую цепь, подсоединяемую к выводам *a* и *б*. В указанном положении автомат отключен и силовая электрическая цепь разомкнута. Чтобы включить автомат, необходимо повернуть по часовой стрелке рукоятку (3). При этом создается усилие, которое, перемещая рычаги (4; 5) вправо, будет поворачивать основную несущую деталь (6) автомата вокруг неподвижной оси *O* по часовой стрелке. В результате замыкаются и включают цепь тока сначала дугогасительные (8; 10), а затем главные (7; 11) контакты автомата. После этого вся система остается в крайнем правом положении, в котором фиксируется и удерживается специальной защелкой (на рисунке не показана).

Отключающая пружина (2) взводится при включении автомата. При подаче команды на отключение она отключает автомат. Когда по катушке (1) электромагнитного расцепителя протекает ток короткого замыкания, на его якоре создается электромагнитная сила, переводящая рычаги (4; 5) вверх за мертвую точку, в результате чего автомат пружиной (2) отключается автоматически. При этом контакты размыкаются, и возникающая на них дуга выдувается в дугогасительную камеру (9) и гасится в ней. Система рычагов (4; 5) выполняет функции механизма свободного расцепления, кото-

рый в реальных автоматах имеет более сложное устройство. Механизм свободного расцепления позволяет автомату отключаться в любой момент времени, в том числе и в процессе включения, когда включающая сила воздействует на подвижную систему автомата. Если рычаги (4; 5) переведены вверх за мертвую точку, то жесткая связь между приводной и подвижной системами нарушается. Мертвая точка соответствует такому положению рычагов, когда прямые линии  $O_1O_2$  и  $O_2O_3$ , соединяющие оси вращения, совпадают по направлению друг с другом. В этом случае автомат немедленно отключается за счет действия возвратной пружины (2), независимо от того, воздействует ли включающая сила на приводимую систему автомата или нет.

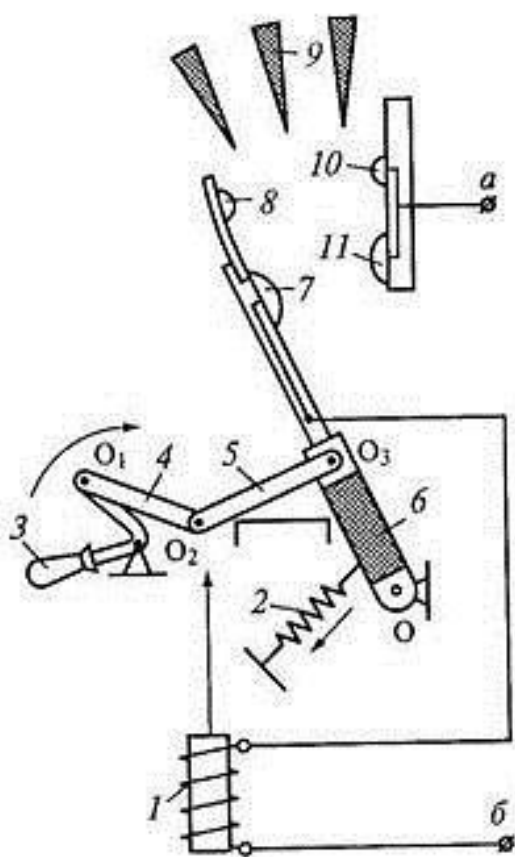


Рис. 69. Схема автоматического выключателя:

1 – катушка расцепителя; 2 – пружина; 3 – рукоятка; 4, 5 – рычаги;  
6 – несущая деталь; 7, 8, 10, 11 – контакты; 9 – дугогасительная камера

При отключении автомата первыми размыкаются главные контакты (7; 11) и весь ток переходит в параллельную цепь контактов (8; 10) с накладками из дугостойкого материала. На главных контактах дуга не может возникать, так как они не должны обгорать, поэтому дугогасительные контакты размыкаются, когда главные контакты расходятся на значительное расстояние.

К аппаратам автоматического дистанционного управления относятся электромагнитные пускатели, контакторы и реле различного рода, коммутация которых осуществляется при подаче на их катушки электрического сигнала (напряжения или тока) и снятия этого сигнала. Они являются двухпозиционными коммутационными аппаратами с самовозвратом, включение и отключение которых осуществляется электрическим сигналом.

### **Аппараты автоматического управления. Назначение, устройство, выбор**

#### ***Электромагнитные пускатели***

Предназначены для дистанционного управления электроустановками (для электродвигателей пуск, остановка, торможение, реверсирование), а также при наличии тепловых реле для защиты от небольших, но длительных перегрузок. Осуществляет пускатель так же защиту электроустановки от снижения напряжения или его исчезновения и от самозапуска двигателя после восстановления напряжения, так называемая нулевая защита. В соответствии с перечисленными функциями в состав пускателя могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе.

Электромагнитные пускатели различаются между собой по:

- назначению (нереверсивные, реверсивные);
- степени защиты от воздействия окружающей среды;
- наличию тепловых реле (без тепловых реле, с тепловыми реле);
- виду блокировки в реверсивных пускателях (механической, электрической, механической и электрической одновременно);
- наличию встроенных в оболочку пускателя кнопок управления (без кнопок, с кнопками);
- величине, габариту или передаваемой мощности;
- напряжению главной цепи и цепи управления.

Главные силовые (линейные) контакты пускателя включают в рассечку проводов, питающих электроустановку (электродвигатель). В проводах двух или трёх фаз включаются также нагревательные элементы тепловых реле. Катушку электромагнита подключают к сети через размыкающие контакты тепловых реле и кнопки управления (рис. 70).

Находят применение пускатели серий ПМЕ и ПА, а также выпускаемые в настоящее время серии ПМ12, ПМЛ, ПМС, ПМА. Пускатели серий ПМ12, ПМЕ, ПМЛ, ПМС, ПМА имеют прямоходовую Ш-образную или П-образную электромагнитную систему, пускатели серий ПА и ПАЕ – поворотнорычажную конструкцию (рис. 71).

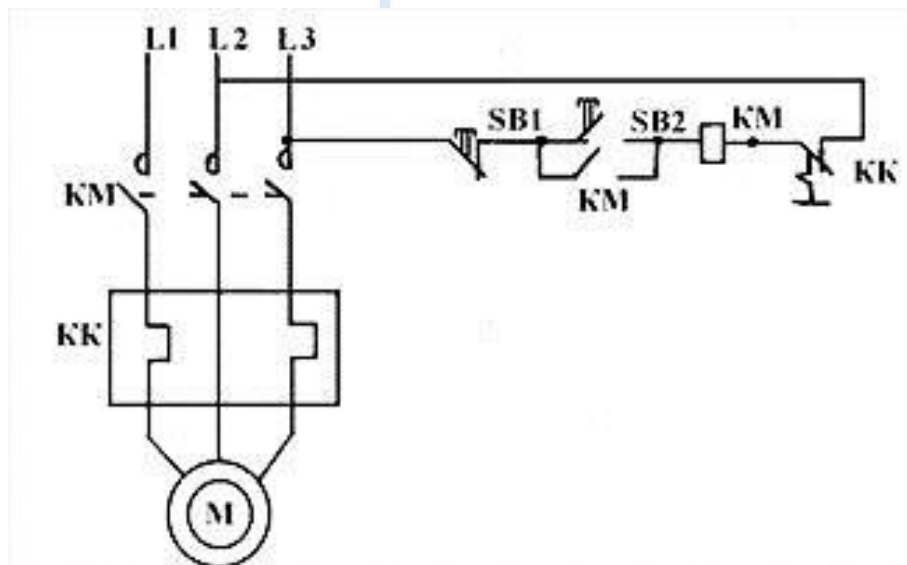


Рис. 70. Схема управления электродвигателем при помощи электромагнитного пускателя

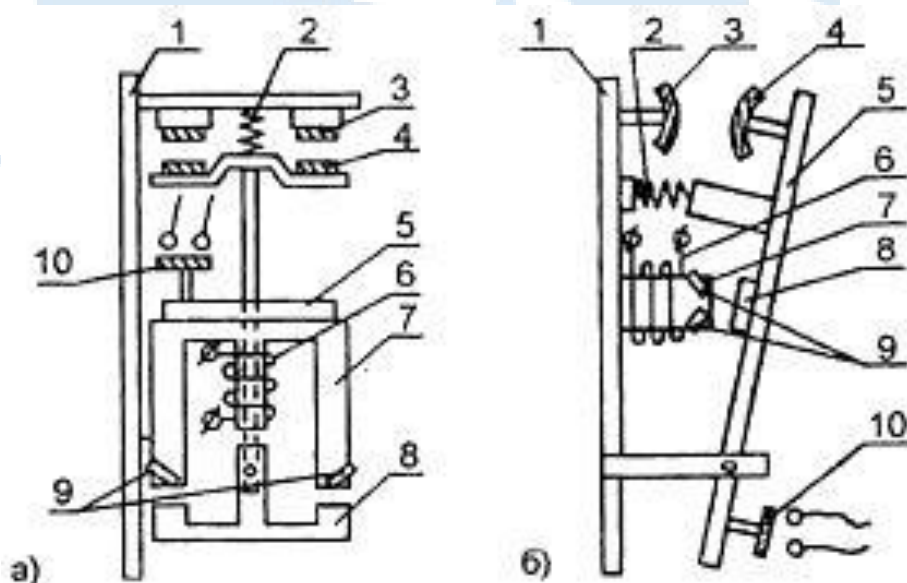


Рис. 71. Устройство магнитных пускателей с прямоходовой Ш-образной (а) и поворотной-рычажной П-образной (б) магнитными схемами:  
 1 – основание; 2 – пружина; 3 – неподвижный контакт; 4 – подвижный контакт; 5 – траверса; 6 – катушка; 7 – сердечник; 8 – якорь; 9 – короткозамкнутый виток; 10 – мостик блок-контактов

Магнитная система пускателей собрана из отдельных листов электротехнической стали. Катушка пускателя питается переменным током, поэтому в магнитопроводе возникает пульсирующий магнитный поток. Для устранения вибрации, износа якоря и подгорания главных контактов торцев

сердечника в области прилегания к нему якоря разрывают и часть его охватывают демпферным короткозамкнутым витком из меди или латуни. В короткозамкнутом витке переменный магнитный поток индуцирует ЭДС, и протекающий по нему ток создает свой магнитный поток, сдвинутый по фазе по отношению к основному. Таким образом, в воздушном зазоре возникают два магнитных потока, сдвинутых между собой по фазе. Их сумма в любой момент не равна нулю, следовательно, сила притяжения электромагнита не уменьшается до нуля.

Пускатели выпускаются по величине 0...7 на мощность 1...100 кВт и токи 4...200 А. Частота включений в час по механической износостойкости при номинальном токе для пускателей по 5-ю величину составляет 3 600, 6-й и 7-й величин – 2 400. Механическая износостойкость для пускателей по 5-ю величину составляет 16 млн циклов, 6-й и 7-й величин – 5 млн циклов. Коммутационная (электрическая) износостойкость пускателей составляет 3 млн циклов.

Электромагнитный пускатель в основном выбирают по величине или габариту, исполнению, наличию реверса и теплового реле, напряжению и другим признакам согласно буквенной и цифровой расшифровке типа пускателя.

### *Электромагнитное реле*

Реле – коммутационное устройство, предназначенное производить скачкообразные изменения в управляемых цепях при заданном значении электрических воздействующих величин. Электромагнитное реле представляет собой аппарат для коммутации слаботочных цепей управления электропривода в соответствии с электрическим сигналом, подаваемым на его катушку. Область применения реле очень широкая. Они используются в качестве датчиков тока и напряжения, промежуточных элементов для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов усилителя электрических сигналов, датчиков времени, выходных элементов различных датчиков координат электропривода и технологических параметров рабочих машин и механизмов.

Электромагнитное реле работает следующим образом (рис. 72). На сердечнике (2) магнитной системы находится катушка (1), на которую подается входной электрический сигнал.

Когда ток (напряжение) превысит некоторое значение, называемое током (напряжением) срабатывания реле, создаваемая им электромагнитная сила станет больше противодействующей силы возвратной пружины (10). Якорь (3) притянется к сердечнику (2) и траверса (6), поднявшись, обеспечит замыкание контактов (8) и размыкание контактов (7). Сила нажатия в контактах создается пружиной 9.

Если уменьшить (отключить) ток (напряжение) в катушке, то якорь (3) под действием пружины (10) перейдет в исходное положение и контакты реле

вернутся в нормальное (исходное) положение. Ток (напряжение), при котором якорь возвращается в исходное положение, носит название тока (напряжения) возврата или отпущения. Отношения тока (напряжения) возврата к току (напряжению) срабатывания называется коэффициентом возврата реле.

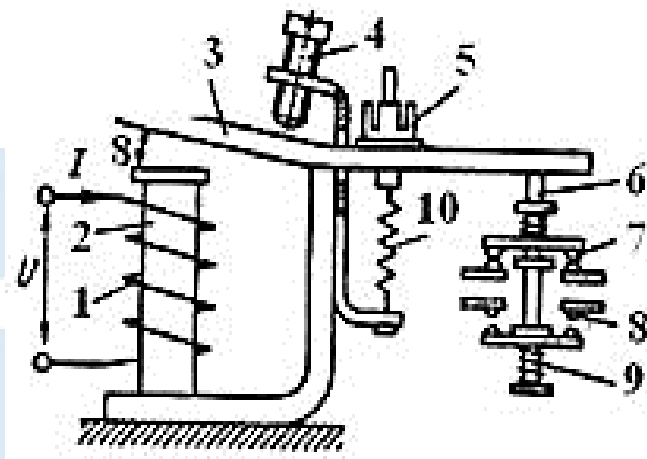


Рис. 72. Электромагнитное реле

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие от миллиампер до 10 А токи, в них обычно не используются дугогасительные камеры, а конструкции контактов простые.

### **Герконовые электромагнитные реле**

Они имеют ту особенность, что их контакты герметизированы, это повышает их износостойкость и надежность в работе. Геркон представляет собой ферромагнитные (сплав железа с никелем) контакт-детали (подвижный и неподвижный контакты) герметично запаянные в стеклянный баллон, заполненный нейтральным газом. Геркон приводится в действие внешним магнитным полем катушки (рис. 73) или постоянного магнита.

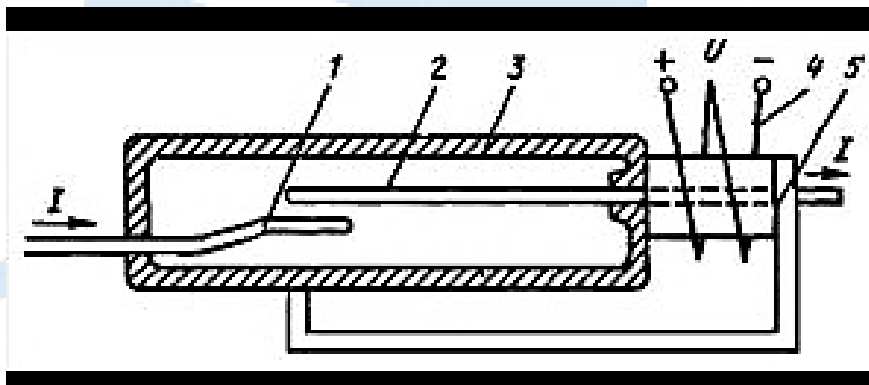


Рис. 73. Герконовое реле

Если на катушку (4) подать напряжение постоянного тока, то в ней начнет протекать ток, создающий в магнито-проводе (5) и контактах (1; 2) магнитный поток. Под его воздействием подвижный контакт (2) переместится и замкнется с неподвижным контактом (1). Контакты заключены в стеклянный корпус (4). Износоустойчивость реле с герконами, способных коммутировать токи до 5 А при напряжении до 100 В, достигает несколько десятков миллионов срабатываний при времени срабатывания 0,3 ... 2,0 мс.

Выпускаются герконовые реле следующих типов: РГК 49, РГК 50, РГК 51, РГК 52, РГК 53, РГК 54 на ряд рабочих напряжений 3, 5, 12, 15, 24 В при коммутируемом токе до 3 А.

### **Аппараты защиты электроустановок. Назначение, устройство, выбор**

К аппаратам защиты, используемым в электроприводе, следует отнести воздушные автоматические выключатели, плавкие предохранители и тепловые реле.

**Автоматические воздушные выключатели.** Автоматические выключатели предназначены для нечастых замыканий и размыканий электрической цепи, находящейся под нагрузкой и длительного прохождения по ней тока, а также отключения цепи при ненормальных и аварийных режимах: коротких замыканий, длительных небольших перегрузок, чрезмерном снижении напряжения питания или его исчезновения.

Контактная система и механизмы автоматического выключателя смонтированы на пластмассовой панели. Он оборудуется подвижными и неподвижными контактами, дугогасительным устройством. Для воздействия на защелку отключающего механизма применяются один или несколько расцепителей, отключающих их главные контакты. Расцепители представляют собой электромагнитные или термобиталлические механизмы, срабатываемые и вызывающие отключение автоматического выключателя мгновенно или с некоторой выдержкой времени. Имеют место наиболее распространенные: электромагнитные расцепители максимального тока, срабатываемые при токе, превышающем ток установки (короткое замыкание, чрезмерный ток перегрузки); электромагнитные расцепители минимального напряжения, срабатываемые, когда напряжение на катушке становится меньше заданного или исчезает полностью; тепловые расцепители, срабатываемые при небольших, но длительных токах перегрузки; расцепители независимые, срабатываемые без выдержки времени, когда на их катушку подано напряжение; электромагнитные расцепители минимального и обратного тока, срабатываемые, когда ток соответственно станет меньше определенного значения или изменит свое направление.

Рассмотрим принцип действия некоторых расцепителей (рис. 74, а, б, в).

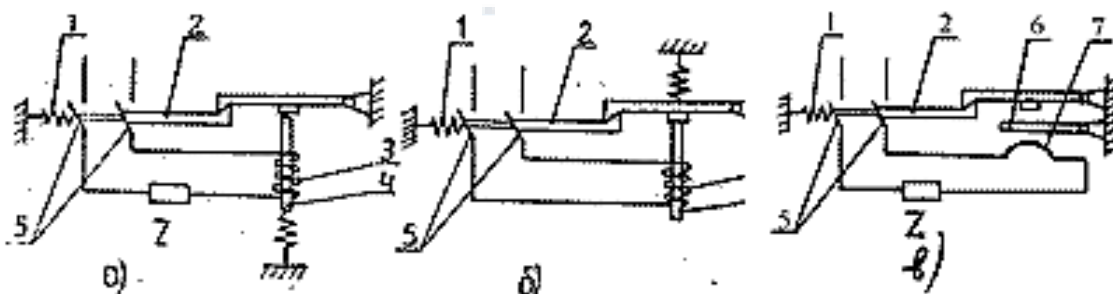


Рис. 74. Схемы действия электромагнитных расцепителей:  
*а* – максимального тока; *б* – минимального напряжения; *в* – теплового расцепителя: 1 – пружина; 2 – защелка; 3 – катушка; 4 – стальной сердечник; 5 – контакты; 6 – биметаллическая пластина; 7 – нагревательный элемент

В автоматическом выключателе с электромагнитным расцепителем максимального тока по достижении током установленного предельного значения или короткого замыкания катушка (3) втягивает стальной сердечник (4) и освобождает защелку (2), которая под действием пружины (1) разрывает силовые контакты (5). В автоматическом выключателе с электромагнитным расцепителем минимального (нулевого) напряжения или тока катушка (3) удерживает сердечник (4) и связанную с ним защелку до тех пор, пока напряжение сети, а, следовательно, и ток в катушке не снизятся до установленного предельного значения или исчезнет совсем, после чего сердечник (4) отпускается, и защелка (2) освобождает пружину (1), цепь силовых контактов (5) при этом разрывается. Электромагнитные расцепители срабатывают практически мгновенно – собственное время срабатывания составляет 0,02 ... 0,03 с. В автоматическом выключателе с тепловым расцепителем ток, проходя по нагревательному элементу (7), нагревает биметаллическую пластину (6), которая снимает защелку (2) пружины (1) и тем самым производит отключение силовых контактов (5). Из холодного состояния при температуре окружающей среды 40 °С и нагрузке 1.1 номинальной тепловой расцепитель не срабатывает в течение часа, при нагрузке 1.35 номинальной срабатывает за 30 минут, а при шестикратной нагрузке – не более чем за 2 ... 10 с.

Автоматический выключатель при наличии трех расцепителей одновременно (электромагнитного максимального значения, электромагнитного минимального значения и теплового) заменяет рубильник, электромагнитный пускатель, плавкую вставку предохранителя и тепловое реле.

Принципиальная схема универсального автоматического выключателя на большие токи приведена на рис. 75.

Токоведущая цепь имеет основные (3) и дугогасительные контакты (1), которые удерживаются или возвращаются в исходное положение пружинной (13). Включение и выключение автоматического выключателя вручную рукояткой 8 или электромагнитами (7) и (11). Звенья (10; 12) и упор (9) представляют собой механизм свободного срабатывания, положение рычагов которого при автоматическом отключении показано штриховой линией.



При токах короткого замыкания автоматический выключатель отключается токовым элементом (5), при понижении напряжения – элементом (6), при токах перегрузки – нагревательным биметаллическим элементом (4). Для гашения возникающий при коммутации дуги служит дугогасительная камера (2).

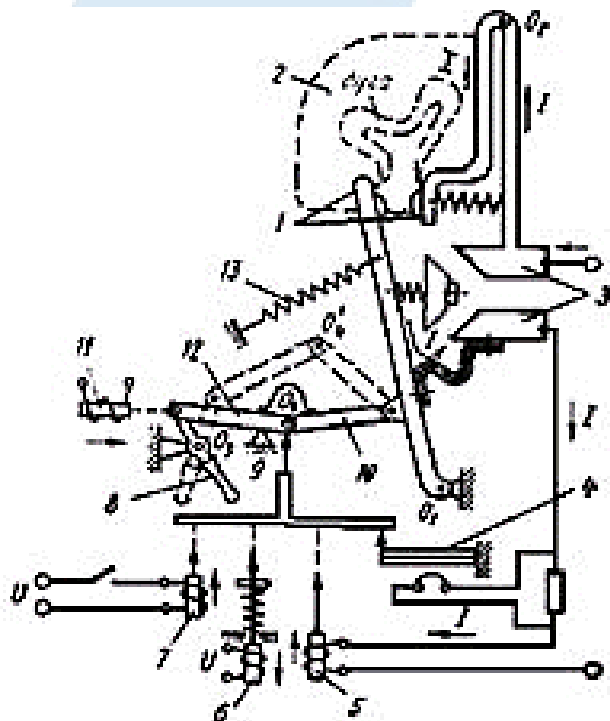


Рис. 75. Принципиальная схема автоматического выключателя на большие токи

По конструктивному оформлению различают автоматические выключатели с пластмассовым корпусом и крышкой на токи до 630 А – установочные и без корпуса и крышки на токи от 630 до 15 000 А – универсальные. По времени отключения различают автоматические выключатели небыстродействующие и быстродействующие.

Рассматривая только установочные автоматы, следует отметить следующие наиболее применяемые серии: АП-50 2(3) МТН; АЕ2000; ВА51-35; А3700...А3716 до 180А; А3726 до 250А; ВА5700...ВА5731 до 16...100А; ВА5735 до 100А; ВА57Ф35 до 100А; ВМ-40П (16,25А); ВМ-403П (16,25,40А); «ЩИТ», ДЭК-1П (10...63А); ДЭК-2П (10-63А); АВ-50-45; ВА 50-41...ВА 56-41; АВ 2М; «Электрон» 306С, 316В, 325С, 325В, 340В, 340С; ВАМУ; Legrand ДРХ и другие.

Номинальные токи автоматических выключателей и уставок расцепителей следует выбирать по расчетному току цепи и возможному току перегрузки. Коммутационную способность проверяют по допустимому току короткого замыкания. Между номинальным током теплового расцепителя  $I_{уст.тепл}$  и рабочим током цепи должно быть условие  $I_{уст.тепл} = 1,25 I_{раб}$ . Ток электромагнитного расцепителя  $I_{уст.эм}$  для питания одиночных электродвигателей должен быть  $I_{уст.эм} = 1,25 I_{пуск}$  ( $I_{пуск}$  – пусковой ток электродвигателя).

Для группы электродвигателей учитывается пусковой ток большего по мощности электродвигателя  $I_{\text{пуск.макс}}$  и суммарный ток остальных, т. е.

$$I_{\text{уст.эм}} = 1,25 \left( I_{\text{пуск.макс}} + \sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{пуск}} \right),$$

где  $n$  – число электродвигателей.

### **Тепловые реле**

Тепловые реле служат для защиты электродвигателей от небольших, но длительных перегрузок, возникающих из-за прохождения по обмоткам повышенных токов, перегрузок рабочего механизма по технологическим причинам, тяжелых условиях пуска, длительного понижения напряжения сети, обрыва одной из фаз. Тепловые перегрузки вызывают ускоренное старение и разрушение изоляции, что приводит к коротким замыканиям. Основное требование к тепловой защите – должна срабатывать при перегрузках электродвигателя свыше 20 % в течении не более 20 минут с момента достижения установившейся температуры. Принцип действия теплового реле аналогичен принципу действия теплового расцепителя автоматического выключателя. Необходимо отметить лишь особенности теплового реле. Термобиметаллическая пластина, способная изгибаться при нагреве, состоит из двух прочно соединенных между собой разнородных металлов, обладающих различными коэффициентами температурного расширения. По способу нагрева биметаллической пластины различают тепловые реле с прямым, косвенным и комбинированным нагревом.

Широкое распространение получили тепловые реле типа ТРН, ТРП, РТТ и РТЛ. Тепловые реле типа ТРН – двухполюсные с температурной компенсацией, ручным возвратом и сменными нагревателями, рассчитанными на токи от 0,32 до 40 А. Тепловые реле ТРП – однополюсные, ручного возврата или самовозвратом, без температурной компенсации и со сменными нагревателями на токи от 25 до 150 А. Трехполюсные реле типа РТТ и РТЛ обеспечивают ускоренное срабатывание при потере фазы и имеют механизм для ускоренного срабатывания, температурную компенсацию, пределы регулирования тока уставки – 0,75...1,25 от номинального. Тепловые реле типа РТТ выпускаются в пяти исполнениях по номинальному току: 0-0,2...10 А; 0,2-1...25 А; 2-10...63 А; 3-63...160 А; 4-125...630 А. Тепловые реле серии РТЛ бывают трех исполнений по номинальному току: РТЛ-1000 – до 25 А, РТЛ-2000 – до 80 А и РТЛ-3000 – до 200 А.

### **Промежуточное тестирование**

1. Устройство и принцип действия реле.
2. Группы классификации реле. Назначение магнитного пускателя, автоматического выключателя.
3. Электромагнитное реле: устройство, назначение, принцип действия.

**ГЛАВА 9. Схемы включения реле.  
Поляризованные электромагнитные реле.  
Контакты реле, средства искро- и дугогашения.  
Особенности конструкции реле времени и тепловых реле**

В том случае, когда сети предприятий не требуют для защиты от аварийных и ненормальных режимов сложных устройств и автоматики, в них применяются устройства защиты на переменном оперативном токе с реле прямого и косвенного действия.

К основным реле прямого действия относятся встроенные в приводы масляные выключатели: мгновенные реле максимального тока РТМ, реле максимального тока с зависимой выдержкой времени РТВ, реле минимального напряжения с выдержкой времени РНВ, электромагнит отключения от независимого источника питания, для приводов ПП-61 и ПП-61К, токовый электромагнит отключения для схем с дешунтированием ЭОтт или ТЭО. Электромагниты дистанционного управления (включения и отключения) устанавливают во всех пружинных приводах.

Токовые реле РТМ, в зависимости от исполнения, имеют уставки тока срабатывания от 5 до 200 А. Токовые реле РТВ с выдержкой времени срабатывания в независимой от тока части в пределах 0,5-4 с имеют следующие исполнения: РТВ-I, РТВ-II и РТВ-III – независимая часть характеристик начинается при кратности тока 1,2-1,7 от тока срабатывания, реле РТВ-IV, РТВ-V и РТВ-VI – при кратности 2,5-3,5. Уставки тока срабатывания реле РТВ в зависимости от исполнения имеют от 5 до 35 А.

Важным параметром реле РТВ является коэффициент возврата  $K_v$ , изменяющийся от 0,6 до 0,89; при большей кратности тока и меньшей выдержке времени защиты принимают большее значение  $K_v$ .

В схемах защиты с дешунтированием применяют токовые электромагниты отключения ТЭО-I с уставкой 1,5 А и ТЭО-II с уставкой 3,5 А в приводах ПП-61, ПП-61К и ПП-67, а электромагниты ЭОтт с уставкой 3,5 А в приводе ППВ-10 и выключателях ВВМ-10 и ВМП-10П.

Реле минимального напряжения с выдержкой времени РНВ предназначено для отключения выключателя при посадке напряжения в пределах 35-65 % номинального с обязательным отключением ниже 35 %. Напряжение срабатывания реле не регулируется. Имеется регулировка выдержки времени от 0,5 до 9 с (реле привода выключателя ВМП-10 от 0 до 4 с).

Реле РНВ включают обычно непосредственно на линейное напряжение во вторичную обмотку трансформатора напряжения.

Для максимальной токовой защиты на переменном оперативном токе применяют комбинированные реле (косвенного действия) максимального тока РТ-85, РТ-86 и РТ-95.

Эти реле состоят из двух основных элементов: индукционного – с вращающимся диском, при помощи которого создается ограниченно зависящая выдержка времени, и электромагнитного – мгновенного действия для выполнения токовой отсечки. Переключающий контакт способен шунтировать и дешунтировать цепь, питаемую от трансформаторов токов при вторичных токах до 150 А.

На рис. 76 и 77 показаны наиболее часто применяемые схемы максимально токовых защит в системах электроснабжения: 6-10 кВ.

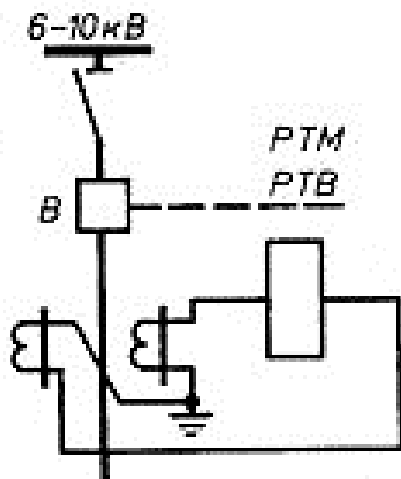


Рис. 76. Схема защиты с одним реле, включенным на разность токов

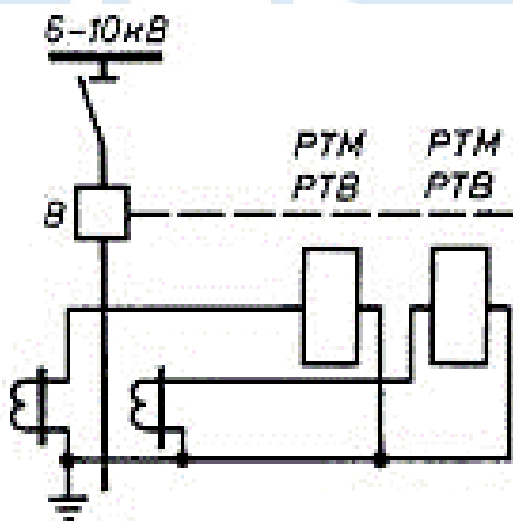


Рис. 77. Схема защиты с двумя реле, включенными на фазные токи

Первая схема имеет наименьшее число токовых реле и соединительных проводов. К ее недостаткам следует отнести: меньшую чувствительность, чем двухрелейной двухфазной схемы, так как ее коэффициент  $K_{сх} = 1,73$  (для двухрелейной двухфазной схемы  $K_{сх} = 1$ ). Отказ защиты при неисправности единственного токового реле или проводов, связывающих его с трансформаторами тока.

Однорелейную схему применяют в распределительных сетях 6-10 кВ для защиты неотчетственных электродвигателей небольшой мощности и статических конденсаторов при соблюдении чувствительности защиты.

Основная схема защиты систем электроснабжения промышленных предприятий – двухрелейная двухфазная. Поскольку в пружинных приводах имеется по несколько реле максимального тока РТМ и РТВ, можно рекомендовать ряд схем включения реле, указанных на рис. 78 и 79.

Пример схемы подключения реле косвенного действия защиты приведен на рис. 80.

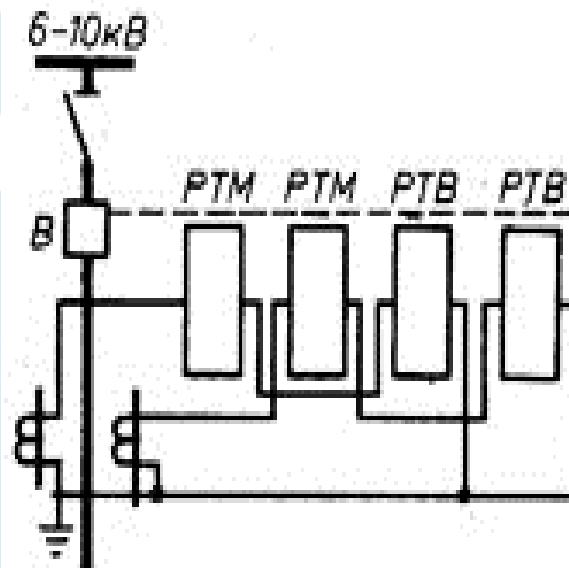


Рис. 78. Схема защиты с реле РТМ и РТВ, включенными на фазные токи

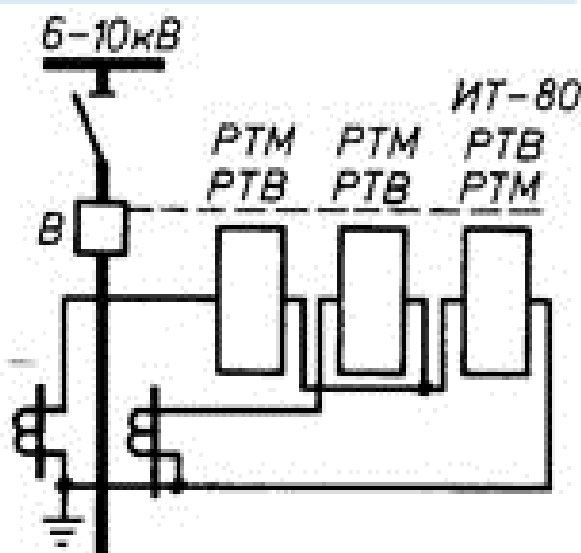


Рис. 79. Схема защиты с двумя реле, включенными на фазные токи, и одним реле, включенным на разность токов

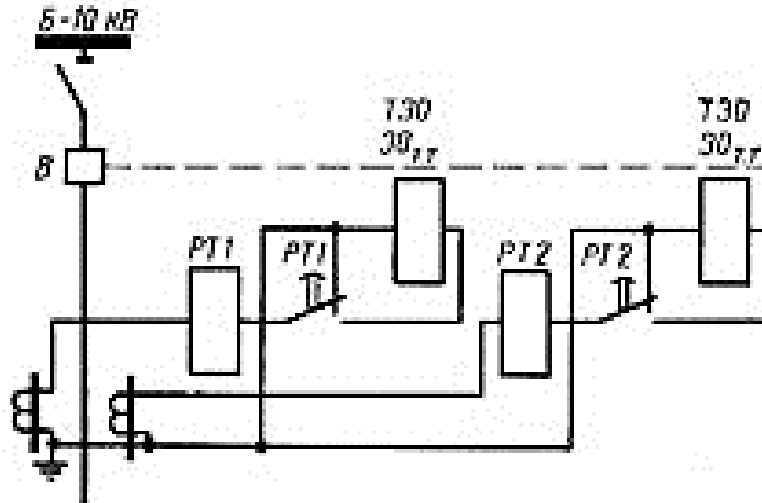


Рис. 80. Схема защиты с дешунтированием электромагнитов отключения

Индукционные реле максимального тока РТ-85, РТ-86, РТ-95 в схеме защиты с дешунтированием имеют ряд преимуществ: осуществление в одном реле максимальной токовой защиты и токовой отсечки, большая чувствительность и точность выполняемой защиты, что допускает меньшие коэффициенты запаса по току срабатывания и меньшие ступени выдержек времени максимальной токовой защиты. Для обеспечения правильной работы устройств релейной защиты погрешность трансформаторов тока не должна превышать по току 10 %.

Выбор (проверка) трансформаторов тока сводится к определению: исходных величин – расчетного вида повреждения, расчетной кратности тока и расчетной вторичной нагрузки, допустимой внешней вторичной нагрузки по кривым кратностей при 10 %-й погрешности, параметров трансформаторов тока при заданном сечении соединительных проводов или допустимого сечения соединительных проводов при заданных трансформаторах тока.

В сетях 6-10 кВ защита от замыканий на землю действует на сигнал, реже на отключение. Общий сигнал замыкания на землю действует от дополнительной обмотки шинного трансформатора напряжения типа НТМИ.

Для определения линии 6-10 кВ, на которой произошло однофазное замыкание на землю, включают указательное реле в цепь трансформатора тока нулевой последовательности или выводят провода от этих трансформаторов тока на центральное устройство сигнализации УСЗ-ЗМ, на котором с помощью поочередного нажатия кнопки определяют линию замыкания.

На рис. 81, а показано включение указательного реле РУ-21, у которого при замыкании на землю на данной линии выпадает флажок. На рис. 81, б показано включение устройства сигнализации УСЗ-ЗМ.

Для отключения при однофазном замыкании на землю используют реле РТЗ-50, которое также включается в цепь трансформатора тока нулевой последовательности (рис. 81, в). К этому реле требуется подпитка от

трансформатора напряжения. Поскольку реле имеет слабые замыкающие контакты, в цепи защиты требуется применять промежуточное реле.

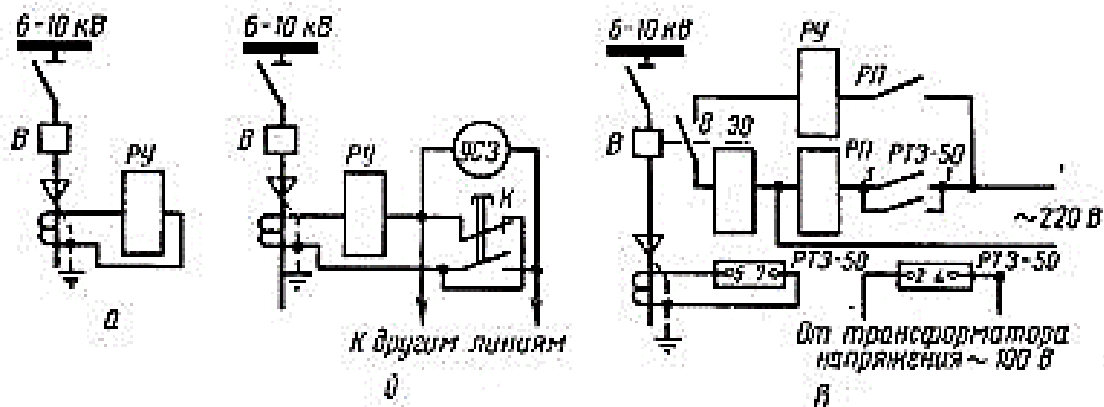


Рис. 81. Схемы защиты от замыканий с действием на землю:  
а, б – на сигнал; в – на отключение

### Поляризованные электромагнитные реле

В отличие от рассмотренных ранее нейтральных электромагнитных реле, у поляризованного реле направление электромагнитного усилия зависит от полярности сигнала постоянного тока в обмотке. Поляризация этих реле осуществляется при помощи постоянного магнита.

Существует много конструктивных разновидностей поляризованных реле, которые классифицируются по ряду признаков. По конструктивной схеме магнитной цепи различают реле с последовательной, параллельной (дифференциальной) и мостовой магнитными цепями, по числу обмоток управления – одно и многообмоточные, по способу настройки контактов (числу устойчивых положений якоря) – двух- и трехпозиционные.

Поляризованные реле могут быть использованы также в качестве вибропреобразователей, но наибольшее распространение они получили в мало-мощной автоматике, особенно в следящих системах при управлении реверсивными двигателями.

К числу *достоинств* поляризованных реле относятся: высокая чувствительность, которая характеризуется малой мощностью срабатывания и составляет  $10^{-5}$  Вт; большой коэффициент управления; малое время срабатывания (единицы миллисекунд).

*Недостатки* по сравнению с нейтральными электромагнитными реле следующие: несколько сложнее конструкция; большие габаритные размеры, вес и стоимость.

В поляризованных реле используют дифференциальные и мостовые схемы магнитных цепей, которые имеют много разновидностей (название цепей определяется типом электрической схемы замещения электромагнит-

ной системы). На рис. 82 изображено *поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи*.

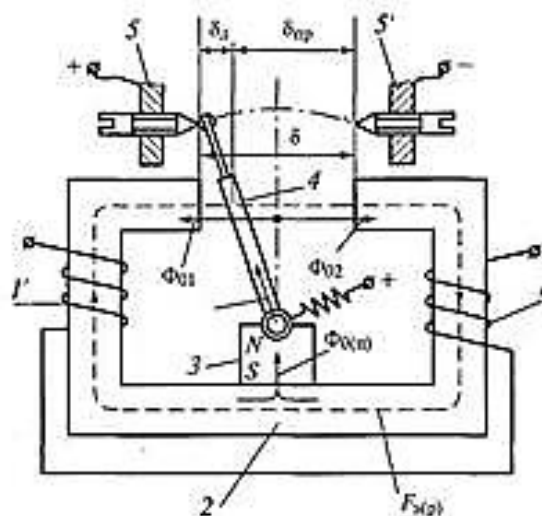


Рис. 82. Поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи:  
 1, 1' — намагничивающие катушки; 2 — ярмо; 3 — постоянный магнит;  
 4 — якорь; 5, 5' — контакты

На якорь реле действует два независимых друг от друга потока: поток  $\Phi_{0(n)}$ , создаваемый постоянным магнитом 3 и не зависящий от рабочего состояния схемы, в которую включено реле, и рабочий (управляющий) поток  $\Phi_{э(р)}$ , создаваемый намагничивающими катушками 1 и 1' и зависящий от тока, протекающего по их обмоткам.

Электромагнитное усилие, действующее на якорь 4, зависит, таким образом, от суммарного действия потоков  $\Phi_{э(р)}$  и  $\Phi_{0(n)}$ . Изменение направления электромагнитного усилия при изменении полярности тока в рабочей обмотке происходит вследствие того, что изменяется направление рабочего потока относительно поляризующего.

Поляризующий поток  $\Phi_{0(n)}$  проходит по якорю и разветвляется на две части —  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  в соответствии с проводимостями воздушных зазоров слева  $\delta_л$  и справа  $\delta_сп$  от якоря. В зависимости от полярности управляющего сигнала рабочий поток  $\Phi_{э(р)}$  вычитается из потока  $\Phi_{01}$  в зазоре слева от якоря и прибавляется к потоку  $\Phi_{02}$  справа от якоря, или наоборот. В случае, показанном на рисунке, якорь перекинется из левого положения в правое. При выключении сигнала якорь будет находиться в том положении, которое он занимал до выключения сигнала. Таким образом, результирующее электромагнитное усилие, действующее на якорь, будет направлено в сторону того зазора, где магнитные потоки суммируются.

Поляризованные реле находят широкое применение в схемах автоматики благодаря своим характерным особенностям. Наличие нескольких обмоток позволяет использовать их в качестве логических элементов, небольшая мощность срабатывания — в качестве элементов контроля небольших



электрических сигналов, малое время срабатывания и чувствительность к полярности входных сигналов – в качестве амплитудных модуляторов и демодуляторов. Благодаря высокой чувствительности поляризованные реле часто используют в маломощных цепях переменного тока с включением через выпрямитель.

### Контакты реле

Применительно к реле это вопрос не праздный, как может показаться. Дело в том, что в этом случае имеются в виду не только механические контакты, которые переключаются внутри устройства. Когда говорят о реле, подразумевают все выводы, находящиеся на его корпусе. Разделить их можно на два вида: контакты обмотки, иногда на реле их может быть больше двух; коммутируемые. Чтобы избежать путаницы, эти выводы часто называют контактами подключения реле. Иногда их количество может достигать 10. При этом из-за отсутствия стандартизации не всегда понятно, куда какую цепь подключать. Контакты обмотки подключены непосредственно к ее выводам. На них подается напряжение, от которого срабатывает реле. Обмоток может быть несколько и у каждой будет своя пара контактов. Иногда катушки могут быть соединены между собой проводниками, если необходимо обеспечить определенный алгоритм их срабатывания.

Материал коммутируемых контактов. Срок службы некоторых реле составляет десятки лет. При этом все его детали испытывают большие нагрузки, особенно контакты. Во-первых, они испытывают механические воздействия, связанные с перемещением якоря. Во-вторых, на них негативно влияют большие токи нагрузки. Поэтому контакты реле должны соответствовать следующим *требованиям*:

- высокая электропроводность;
- обеспечивают малое падение напряжения;
- хорошие антикоррозийные качества;
- высокая температура плавления;
- малая эрозия;
- контакты должны быть стойки к переносу металла, который неизбежен при постоянном замыкании и размыкании.

Все перечисленные качества напрямую зависят от используемого материала.

Рассмотрим *основные металлы*, используемые для изготовления реле.

**Медь** полностью отвечает выдвигаемым требованиям, за исключением стойкости к коррозии. Поэтому часто используется в контактах реле с герметичным корпусом. Кроме того, медь обладает еще одним плюсом – относительно низкой стоимостью, по сравнению с другими металлами. Единственным ее недостатком является склонность к окислению при длительной работе. Поэтому используется она там, где предусмотрен кратковременный режим работы, например, в контактах реле поворотов.

**Серебро** обладает отличной проводимостью и износоустойчивостью. Не вызывает искрения при коммутации индуктивной нагрузки. При этом серебряные контакты не обладают достаточной дугостойкостью, поэтому не могут использоваться для управления нагрузками значительной мощности. Кроме того, у них достаточно высокая стоимость. Поэтому контакты имеют комбинированную конструкцию – медь с напылением серебра.

**Вольфрам** обладает большой износоустойчивостью и стойкостью к высокой температуре. Изготовленные из него контакты способны коммутировать очень высокие токи (десятки ампер).

Кроме материала, контакты реле различаются *по способу коммутации*.

**Нормально разомкнутые.** Именно такие контакты рассматривались до сих пор. В нейтральном положении, т. е. когда на обмотку реле не подается питание, они разомкнуты. После включения напряжения якорь притягивается к сердечнику и контакты замыкаются. Нормально разомкнутые контакты чаще других используются в различных электрических схемах, в основном в качестве промежуточных.

**Нормально замкнутые.** Алгоритм их работы прямо противоположен. Контакты замкнуты при обесточенном реле, и отключаются при появлении на обмотке напряжения. Используется это при реализации различных блокировок и в цепях сигнализации. Типичным примером использования нормально замкнутых контактов является механическое реле регулятор. Коротко о его работе поговорим ниже. Через нормально замкнутые контакты подается напряжение на обмотку возбуждения. Соответственно, при отпущенном якоре генератор вырабатывает электрический ток. Происходит подзарядка аккумулятора. Как только напряжение в бортовой сети превышает установленное значение, якорь притягивается, контакты реле-регулятора отпускаются, обмотка возбуждения обесточивается. В итоге снижается напряжение на выходе генератора. Кстати, несмотря на то, что давно появились электронные реле-регуляторы, владельцы старых автомобилей не спешат ставить их вместо механических. Связано это с безотказной работой последних в течение многих лет.

**Переключающие.** В этом случае у реле есть и нормально замкнутый, и разомкнутый контакты. Причем всего их не четыре, как может показаться, а три. Дело в том, что один из них общий. Всего на корпусе реле 5 контактов (два вывода обмотки и три коммутируемых). Благодаря своей универсальности радиотехнические элементы этого типа получили самое широкое распространение. Поэтому большинство современных реле имеют переключающие контакты, иногда даже несколько групп.

#### ***Разновидности контактов***

Известны 3 разновидности контактов:

- неразъемный контакт (соединение двух шин болтом);
- скользящий (с помощью реостата);
- коммутирующий.

**По форме контакты бывают:**

– **точечные**, они, в основном, используются для малых токов, при этих контактах происходит небольшое нажатие, а для того, чтобы уменьшить сопротивление контактов, применяются не окисляющиеся драгоценные металлы;

– **линейные**, с большой степенью нажатия и контактированием по линии, для производства этих контактов используется медь;

– **поверхностные**, применяются с большой степенью нажатия для контактирования при больших токах между двух поверхностей.

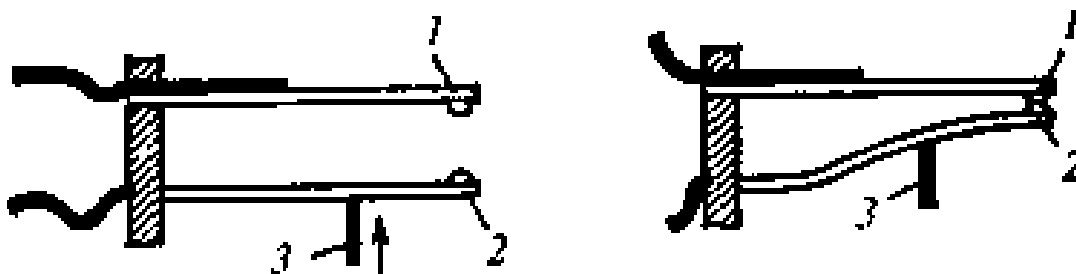
Электрические контакты также бывают *подвижные* и *неподвижные*.

Подвижные контакты в процессе работы замыкаются, соединяясь между собой, либо размыкаются, разъединяясь с помощью механического или электромеханического привода, при этом устройства между собой остаются надежно скреплены.

В процессе работы неподвижных контактов токоведущие надежно и плотно соединенные между собой элементы не перемещаются друг относительно друга.

Чтобы создать замкнутую электрическую цепь, нужно произвести несколько контактов.

Одним из примеров подвижного контакта является устройство рычажного контакта, рассчитанное на средние и большие токи, в котором в качестве материала применяется медь. Устройство рычажного контакта приведено на рис. 83.



*Рис. 83. Устройство рычажного контакта*

Шарнирный контакт, где неподвижный элемент и подвижный элемент соединяются между собой с помощью силы, действующей на рычаг, может служить еще одним примером подвижного контакта.

Скользящие контакты – это еще одна разновидность подвижных контактов, у которых, как и в щеточноколлекторном устройстве электрических машин постоянного тока, один элемент перемещается относительно других. На рис. 84 приведено устройство шарнирного контакта.

Также к подвижным контактам можно отнести герметизированные магнитоуправляемые контакты или герконы, простейший пример которых

представляет собой запаянную стеклянную колбу миниатюрного размера, с двумя плоскими впаянными контактными пружинами, состоящими из мягкой магнитной стали.

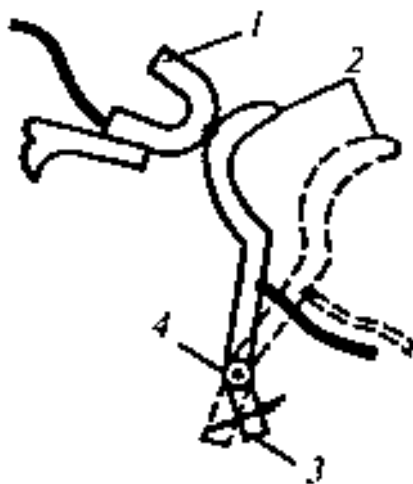


Рис. 84. Устройство шарнирного контакта

Если эти герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) поместить в созданное обмоткой или постоянным магнитом магнитное поле, то их пружины будут намагничиваться и затем притягиваться друг к другу.

В это время происходит замыкание контактов и, как следствие, может замкнуться электрическая цепь. Контакты из-за силы упругости пружин разомкнутся только после полного исчезновения магнитного поля. Поверхности пружин на контактах покрываются тонким слоем драгоценного металла, имеющего малое удельное электрическое сопротивление (платина, золото, серебро).

С помощью герконов можно производить коммутации в электрических цепях при малых значениях тока от 0,5 до 1 А. Колбу геркона вакуумируют или заполняют инертным газом.

Элементы геркона имеют малую массу и высокое быстродействие контактов от 0,5 до 1,0 мс.

Износоустойчивость – это самое важное свойство герконов. У некоторых видов герконов количество переключений может достигать до двух тысяч в секунду, а срабатываний до сотен миллионов.

*Герсиконы* – это герметические магнитоуправляемые силовые контакты, являющиеся разновидностью герконов, которые позволяют произвести коммутации в электрических цепях при значениях тока 60 А, 100 А или 180 А и при напряжении 220 440 В. На рис. 85 приведено устройство магнитоуправляемого герметизированного контакта (геркона).

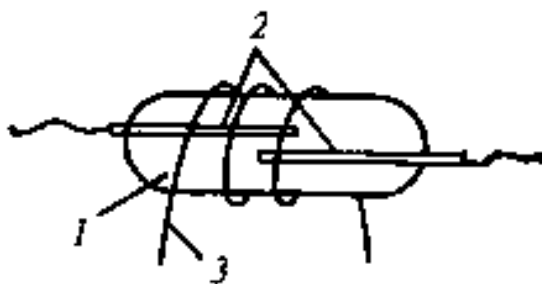


Рис. 85. Устройство магнитоуправляемого герметизированного контакта (геркона)

### Устройства искро- и дугогашения

Самый эффективный способ для гашения электрической дуги – это ее охлаждение с помощью соприкосновения с изоляционными стенками специальных камер, которые отбирают теплоту дуги или за счет ее перемещения в воздухе.

В современных аппаратах широкое распространение получили дугогасительные камеры с узкой щелью и магнитным дутьем.

Дугу можно рассматривать как проводник с током; если его поместить в магнитное поле, то возникнет сила, которая вызовет перемещение дуги. При своем движении дуга обдувается воздухом; попадая в узкую щель между двумя изоляционными пластинами, она деформируется и вследствие повышения давления в щели камеры гаснет (рис. 86).

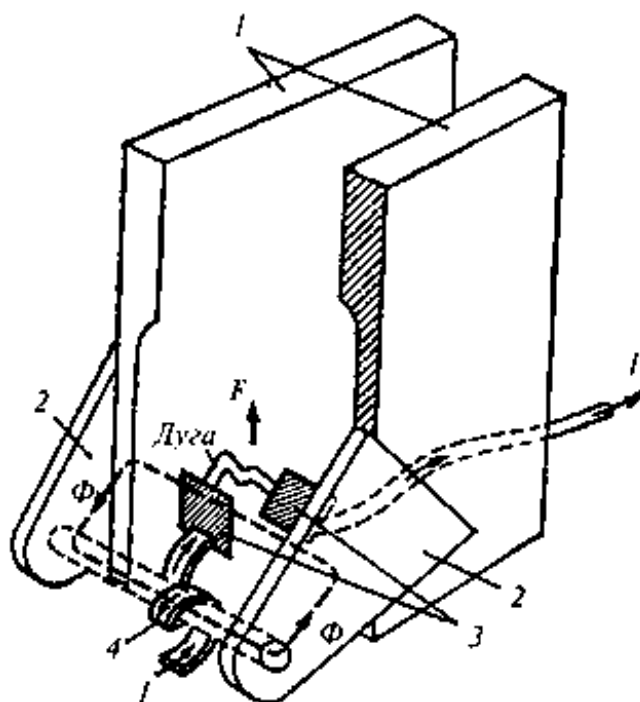


Рис. 86. Устройство камеры дугогашения с узкой щелью

Щелевая камера образована двумя стенками (1), выполненными из изоляционного материала. Зазор между стенками очень мал. Катушка (4), включенная последовательно с главными контактами (5), возбуждает магнитный поток  $\Phi$ , который направляется ферромагнитными наконечниками (2) в пространство между контактами. В результате взаимодействия дуги и магнитного поля появляется сила  $F$ , вытесняющая дугу к пластинам (7).

Эта конструкция дугогасительной камеры применяется и на переменном токе, так как с изменением направления тока изменяется направление потока  $\Phi$ , а направление силы  $F$  остается неизменным.

Для уменьшения искрения на маломощных контактах *постоянного тока* применяют включение диода параллельно нагрузочному устройству (рис. 87). При этом цепь после коммутации (после отключения источника) замыкается через диод, таким образом уменьшается энергия искрообразования.

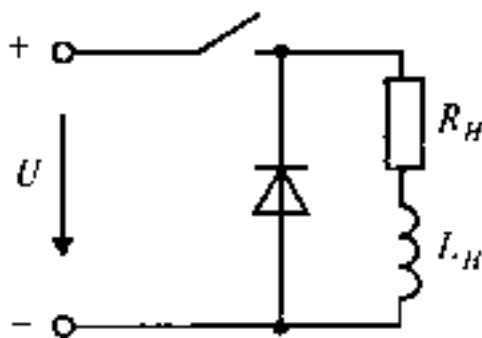


Рис. 87. Включение диода для уменьшения искрения

## Реле времени

Реле времени создает регулируемую выдержку времени от момента подачи сигнала на срабатывание до момента замыкания (или размыкания) контактов. Программное реле – это разновидность реле времени с несколькими контактами, имеющими различные регулируемые, как правило, независимые друг от друга выдержки времени. Например, существуют реле счета импульсов, контакты которых замыкаются после отсчета заранее заданного числа импульсов, подаваемых на катушку управления. Устройство таких реле имеет много общего с шаговыми искателями.

Для создания выдержки времени применяются электрический разрядный *RC*-контур, электромагнитные реле с короткозамкнутыми гильзами, механические механизмы (анкерный и планетарный), пневматические и др.

На рис. 88 дана схема *реле времени с пьезокерамическим элементом*. Пьезокерамические материалы, полученные, например, на основе титаната бария, обладают свойством изменять свои линейные размеры в электрическом поле. Пьезокерамический биморфный элемент (БЭ) состоит из двух

прочно склеенных пластинок, на наружных поверхностях которых, а также в месте их соединения размещены металлические обкладки. Верхний слой элемента в электрическом поле удлиняется, нижний – укорачивается. В результате этот элемент, консольно закрепленный на одном конце, изгибается, что приводит к замыканию контакта К1. При снятии электрического поля с обкладок деформация биморфного элемента исчезает, контакт К1 размыкается, а контакт К2 замыкается.

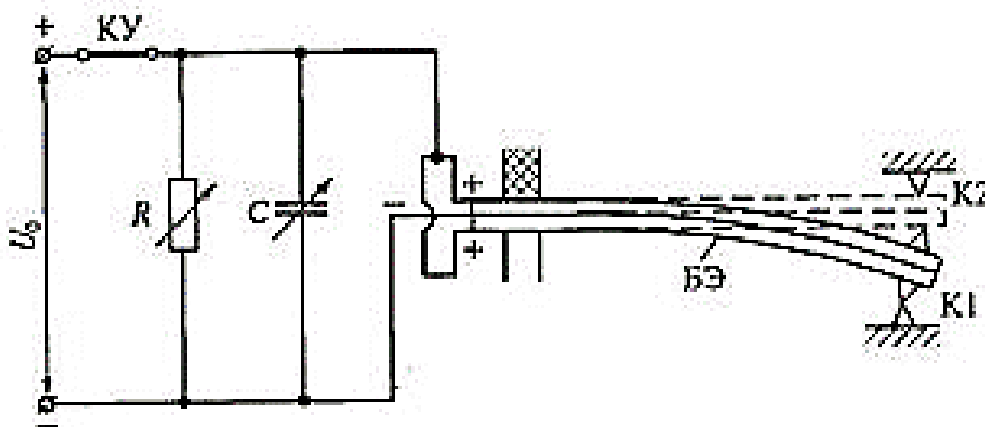


Рис. 88. Схема реле времени с пьезокерамическим элементом

При замкнутой кнопке управления (КУ) конденсатор  $C$  и обкладки БЭ заряжены до напряжения  $U_0$  и сам БЭ деформирован. При отключении КУ начинается разряд конденсатора  $C$  на резистор  $R$ . Напряжение на обкладках БЭ постепенно снижается, и его механическая деформация также постепенно исчезает.

Процесс разряда конденсатора описывается уравнением

$$RI + (I/C) \int I dt = 0.$$

Решение этого уравнения при начальном условии  $t = 0$  и  $I = I_0$  имеет вид

$$I = I_0 e^{-t/(RC)}.$$

Изменение напряжения на конденсаторе в обкладках БЭ описывается аналогичной зависимостью:

$$U = U_0 e^{-t/(RC)}.$$

Допустим, что реле срабатывает и его контакт К2 замыкается, когда напряжение снизится до значения  $U_{сраб.}$ . Тогда время срабатывания:

$$T_{сраб} = RC \ln(U_0/U_{сраб.}).$$

Реле времени с электромагнитным замедлением (электромагнитное реле времени) основано на использовании вихревых токов для замедления

срабатывания электромагнитной системы. На магнитопровод (1) (рис. 89) надета металлическая (обычно медная) гильза (или шайба) (3), равнозначная короткозамкнутой обмотке с одним витком. Когда изменяется основной поток  $\Phi_0$ , созданный током катушки (2), в гильзе (3) наводятся вихревые токи, поток  $\Phi_{\text{вх}}$  от которых имеет направление, препятствующее изменению основного потока в соответствии с принципом инерции Ленца. Когда поток  $\Phi_0$  нарастает, поток  $\Phi_{\text{вх}}$  имеет противоположное направление, а когда  $\Phi_0$  снижается – направление  $\Phi_{\text{вх}}$  совпадает с  $\Phi_0$ .

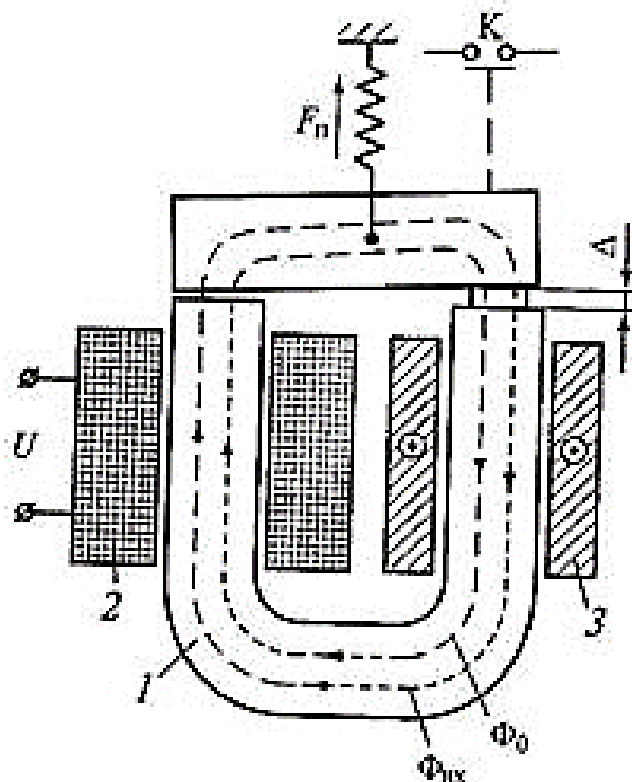


Рис. 89. Электромагнитное реле времени:  
1 – магнитопровод; 2 – катушка; 3 – медная гильза

Широко распространены реле времени с механическим замедлением, в частности с часовым механизмом. В таких реле (рис. 90) при подаче напряжения на электромагнитный привод (1) растягивается пружина (2) и часовой механизм приходит в действие. Анкер (4), поворачиваясь вокруг оси  $O_2$ , «перепускает» зубчатый диск (3), который вращается вокруг оси  $O_1$ . Перемещающийся вместе с ним рычаг (8) в конце пути упирается в пластинчатый контакт (9) и замыкает его. Храповой механизм дает подвижной системе реле возможность возвратиться в исходное положение, когда будет снято напряжение электромагнитного привода (1). Возврат осуществляется специальной пружиной (на рисунке не показана). Изменяя расстояние от грузика (5) до оси  $O_2$  и массу грузика, можно регулировать момент инерции анкера и через него – выдержку времени реле.



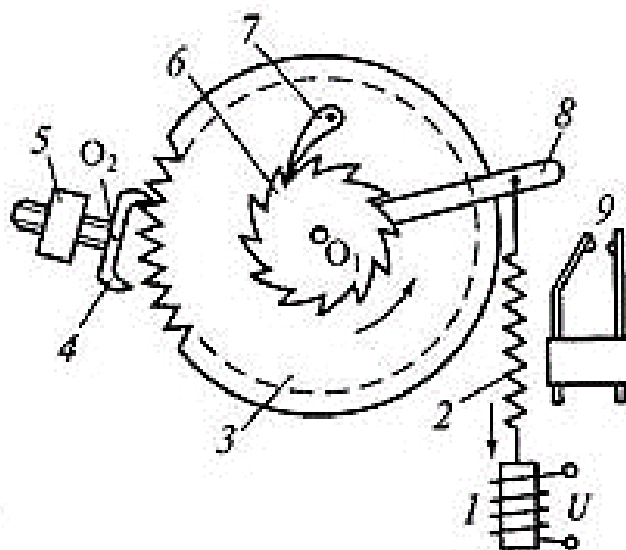


Рис. 90. Реле времени с анкерным механизмом:  
 1 – электромагнитный привод; 2 – пружина; 3 – зубчатый диск;  
 4 – анкер; 5 – грузик; 6 – храповое колесо; 7 – собачка; 8 – рычаг;  
 9 – пластинчатый контакт

Выдержка времени, создаваемая реле с часовым механизмом,

$$T = \alpha n z T_a,$$

где  $\alpha$  – угол поворота подвижной системы от начала движения до замыкания контактов;  $n$  – передаточное число зубчатого механизма;  $z$  – число зубьев ходового колеса;  $T_a$  – период колебаний анкера,

$$T_a = 2\pi \sqrt{J\varphi / (M_{дв} - M_{прд})},$$

где  $J$  – момент инерции анкера;  $\varphi$  – угол поворота анкера при колебаниях;  $M_{дв}$  – момент, создаваемый движущимися силами;  $M_{прд}$  – момент, создаваемый противодействующими силами.

В некоторых реле применяется пневматическое или гидравлическое замедление. Изменением сечения отверстия, через которое проникает воздух (или жидкость) из одного объема в другой, достигается регулировка выдержки времени. Наиболее высокие выдержки времени (до несколько часов) достигаются в реле с планетарными механизмами.

## Тепловые реле

Измерительным органом теплового реле является *биметаллический элемент*, который при нагреве изгибается и переводит контактную систему в отключенное или включенное состояние. Биметаллический элемент представляет собой двухслойную пластинку из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). При нагреве слой

термоактивного металла существенно расширяется, в то время как слой термоинертного металла почти не деформируется. Если один конец биметаллической пластинки жестко закрепить, то другой свободный конец ее будет изгибаться.

Пластинки биметаллического элемента, прочно соединенные между собой, должны иметь возможно большую разность ТКЛР, что будет увеличивать чувствительность теплового реле. Пределы упругости компонентов биметалла должны быть высокими. В этом случае для них допустима большая температура нагрева, не вызывающая остаточных деформаций.

В качестве материала с низким ТКЛР (термоинертного компонента) часто применяется сплав никеля с железом, называемый инваром. Инвар 36Н содержит 36 % никеля, инвар 39Н – 39 %. В качестве термоактивного компонента с высоким ТКЛР используются различные стали, латунь, константан и другие материалы.

На рис. 91 изображена конструктивная схема теплового реле. Биметаллическая пластина (1) такого реле упирается в верхний конец пружины (7). Нижний конец пружины давит на выступ пластмассовой колодки (4), которая может поворачиваться вокруг оси  $O_1$ .

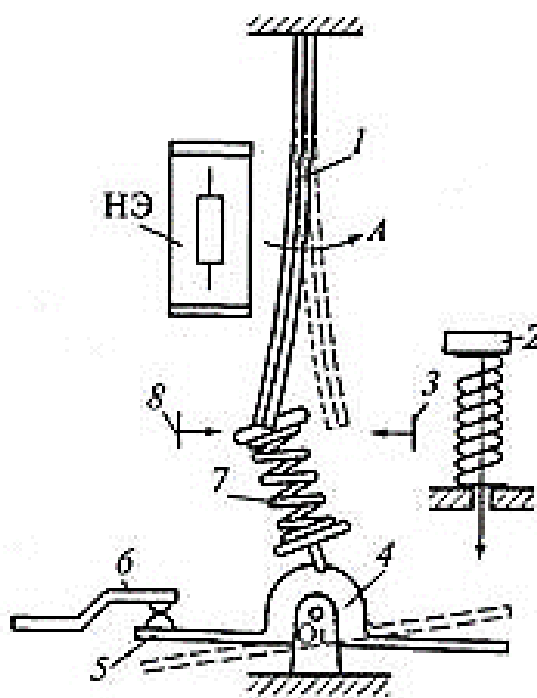


Рис. 91. Схема теплового реле:

- 1 – биметаллическая пластина; 2 – кнопка ручного возврата;  
3, 8 – упоры; 4 – пластмассовая колодка; 5 – подвижный контакт;  
6 – неподвижный контакт; 7 – пружина

В положении, изображенном на рис. 91, движение пластины (1) и верхнего конца пружины (7) влево ограничено упором (8). Сила пружины (7)

воздействует на выступ пластмассовой колодки (4) так, что она оказывается повернутой по часовой стрелке, а укрепленный на ней подвижный контакт (5) – замкнутым с неподвижным контактом (6).

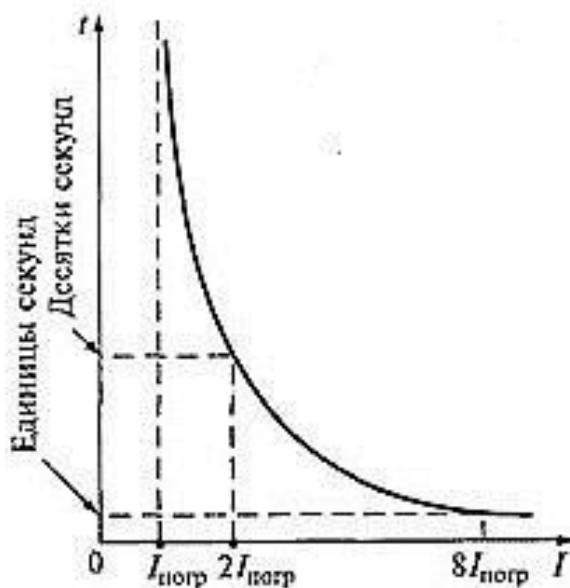


Рис. 92. Характеристика теплового реле

При протекании повышенного тока по нагревательному элементу – НЭ (или непосредственно по пластине (1)) – биметаллическая пластинка (1) нагревается и ее нижний конец перемещается в направлении стрелки А. В результате верхний конец пружины (7) переходит вправо и создаваемая ею сила воздействует на колодку (4) так, что она поворачивается на некоторый угол против часовой стрелки, а контакты (5, 6) размыкаются. Упоры (3, 8) ограничивают перемещение нижнего конца пластины (1). Возврат реле в исходное положение происходит самопроизвольно, когда биметаллическая пластинка остынет. В других конструкциях перевод реле в исходное положение осуществляется кнопкой ручного возврата (2).

На рис. 92 дана типичная для тепловых реле зависимость времени срабатывания  $t$  от тока  $I$ . При минимальном (пограничном) токе срабатывания  $I_{\text{погр}}$  время срабатывания велико, с увеличением тока оно уменьшается.

### Промежуточное тестирование

1. Поляризованные электромагнитные реле: назначение, принцип действия, достоинства, недостатки.
2. Контакты реле: требования, материал изготовления, способ коммутации, разновидности.
3. Назначение устройства искро- и дугогашения. Назначение реле времени.

## **ГЛАВА 10. Назначение, классификация и характеристики исполнительных элементов и устройств**

### **Исполнительные элементы систем автоматики, классификация и общие характеристики исполнительных элементов**

#### ***1. Классификация исполнительных элементов***

Исполнительные элементы (ИЭ) систем автоматики предназначены для создания управляющего воздействия на регулирующий орган (РО) объекта управления (ОУ). При этом изменяется положение или состояние РО, что приводит в конечном итоге к изменению положения или состояния ОУ в соответствии с алгоритмом управления.

Один из вариантов классификации исполнительных элементов САУ представлен на рис. 93.

В зависимости от управляющего воздействия на выходе ИЭ делятся на два вида: силовые и параметрические. Изменение пространственного положения РО возможно в том случае, если ИЭ создают управляющее воздействие в виде силы или момента. Такие ИЭ получили название силовых. К ним относятся электромагниты, электромеханические муфты, различные виды двигателей.

Например, в системе автоматического управления полетом летательного аппарата по высоте ИЭ является двигатель, изменяющий положение руля высоты при отклонении действительного значения высоты от заданного. Устройство, содержащее двигатель, редуктор и элементы управления двигателем (усилитель, реле, контактор, золотниковый распределитель и т. п.), называют силовым приводом, или просто приводом. В зависимости от вида энергии, подводимой к двигателю, различают электро-, пневмо- и гидроприводы. Находят применение и комбинированные приводы: электрогидравлический и пневмогидравлический.

Еще одним вариантом ИЭ является следящий привод, который воспроизводит на выходе заданное на входе перемещение, но с большим механическим усилием, т. е. момент или сила на выходе его существенно больше, чем на входе. Следящий привод широко применяется в автоматических манипуляторах (роботах), станках с числовым программным управлением (ЧПУ), для управления прокатными станами, антеннами радиолокаторов, в космической и ракетной технике и т. д.

БГАРФ

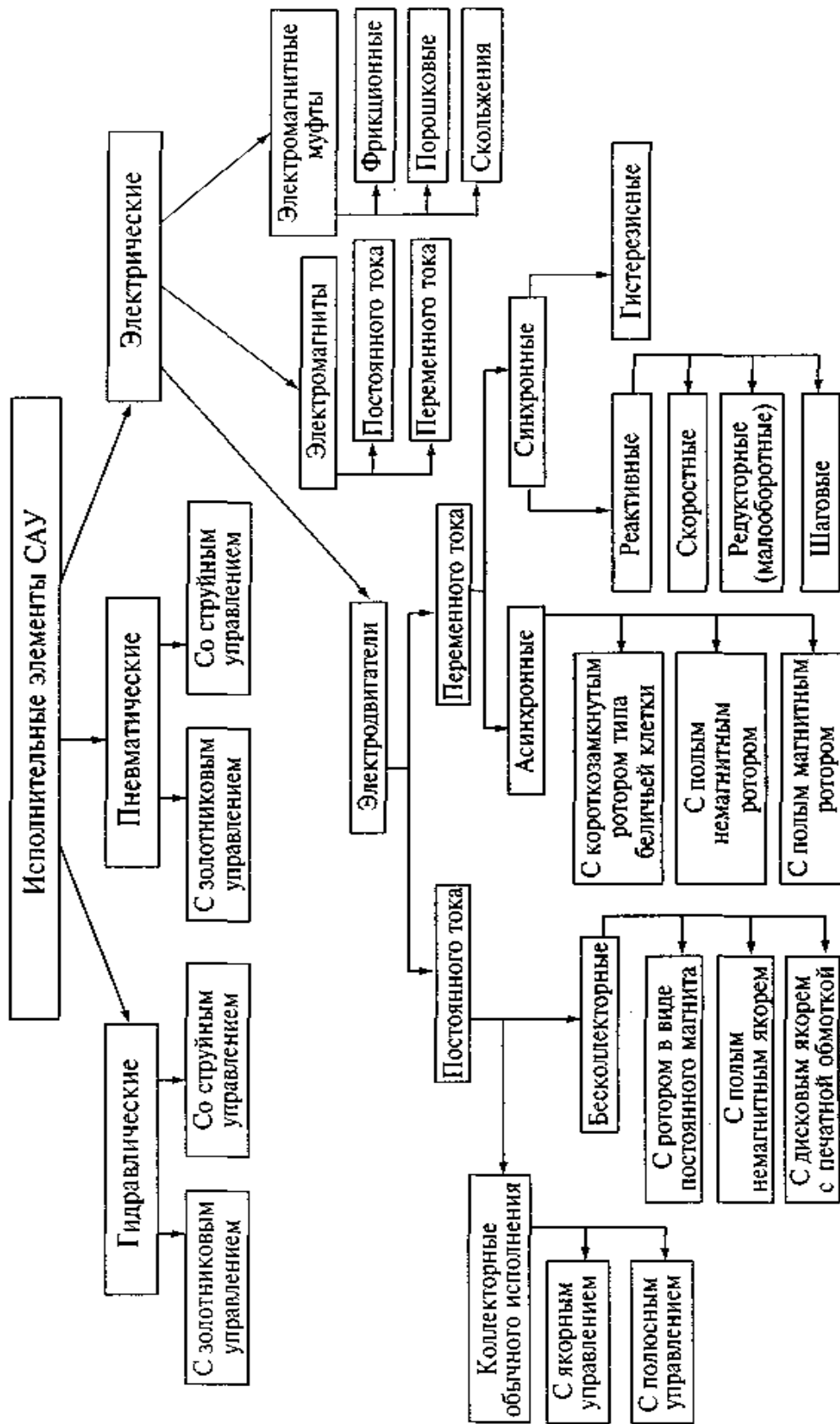


Рис. 93. Один из вариантов классификации исполнительных элементов САУ

Следящий привод является частным случаем следящих систем. Формально этот привод относится не к элементам автоматики, а к устройствам, так как в нем объединяются несколько элементов. Но в сложных (комплексных) САУ привод может рассматриваться как один функциональный элемент – исполнительный.

Изменение состояния РО связано с изменением его параметров (сопротивления, магнитного потока, температуры, скорости и т. п.) или параметров энергии, подводимой к нему (напряжения, тока, частоты, фазы – в электрических устройствах; давления рабочей среды – в пневматических и гидравлических устройствах).

Исполнительные элементы, изменяющие состояние РО, называются параметрическими. Например, в автоматическом управляющем устройстве термостата исполнительным элементом (ИЭ) является усилитель, нагрузкой которого служит нагревательный элемент РО термостата. При отклонении температуры от заданного значения изменяется входное напряжение усилителя; при этом изменяется и выходное напряжение, а следовательно, и ток в нагревательном элементе и температура в термостате. В этом устройстве усилитель совмещает в себе функции и усилителя, и ИЭ. Он создает управляющее воздействие (напряжение, ток), изменяющее температуру нагревательного элемента, например, РО. Такое использование усилителей довольно часто встречается в устройствах автоматики. Усилители одновременно являются основным видом параметрических ИЭ.

Особенно часто в качестве параметрических ИЭ используются электромагнитные реле, контакторы, тиристорные и транзисторные реле.

Силовые ИЭ в зависимости от характера движения их выходного вала можно разделить на три вида: с линейным, поворотным (угол поворота меньше  $360^\circ$ ) и вращательным (угол поворота больше  $360^\circ$ ) движениями. Статистическая характеристика ИЭ может быть линейной, нелинейной, реверсивной, неревверсивной и т. д.

К силовым ИЭ предъявляется ряд требований, которые обусловлены конструкцией и алгоритмом работы ОУ, условиями эксплуатации и т. п. Основными требованиями, которым должны удовлетворять характеристики и параметры ИЭ, являются следующие:

- максимальная сила или момент, развиваемые ИЭ, должны быть заведомо больше, чем максимальная сила или момент, необходимые для перемещения РО объекта управления во всех режимах работы;
- высокое быстродействие;
- максимальный КПД;
- статическая характеристика ИЭ должна быть близка к линейной, если в процессе работы управляющее воздействие, создаваемое ИЭ, должно плавно регулироваться;
- минимальный порог чувствительности;
- небольшая мощность управления ИЭ;

- высокая надежность и долговечность;
- небольшие размеры и масса.

## **2. Общие характеристики исполнительных элементов**

*Исполнительный элемент (исполнительное устройство)* – функциональный элемент системы автоматического управления, осуществляющий воздействие на объект управления путем изменения потока энергии и потока материалов, поступающих на объект. Исполнительные элементы в основном бывают двух типов:

- с механическим двигателем (в частности, сервомотор, серводвигатель или сервопривод), в этом случае исполнительный элемент производит механическое перемещение регулирующего органа;
- с электрическим выходом, в этом случае воздействие, непосредственно прикладываемое к объекту регулирования, имеет электрическую природу.

Например, в регуляторе напряжения генератора постоянного тока регулирующим воздействием является напряжение возбуждения, получаемое от усилителя.

В зависимости от характера объекта и вида вспомогательной энергии, применяемой в системе автоматического управления, роль исполнительных элементов выполняют самые разные конструктивные элементы: электронные, электромашинные, магнитные или полупроводниковые усилители, реле, пневматические или гидравлические сервомоторы и др.

Динамические характеристики исполнительных элементов с механическим выходом отличаются значительно большей инерционностью, чем элементы с электрическим выходом. Часто исполнительные элементы второго типа служат приводом исполнительных элементов первого типа.

Сервоэлектродвигатели, применяемые в качестве исполнительных элементов с механическим выходом, отличаются специальным исполнением, обеспечивающим пониженную инерционность (удлиненным ротором малого диаметра, полым ротором). Значительно меньшую инерционность при той же мощности имеют гидравлические и пневматические серводвигатели.

Требования к исполнительным элементам определяются характеристиками объекта регулирования и требуемым качеством процесса регулирования.

*Исполнительный механизм (сервопривод)* – исполнительный элемент с механическим выходом. Исполнительные механизмы классифицируются по назначению и типу управляемых элементов, виду осуществляемых перемещений, роду применяемой энергии.

Исполнительные механизмы предназначаются для привода:

- элементов, регулирующих потоки энергии, жидкости, газа, сыпучих и перемещаемых твердых тел (реостатов, клапанов, задвижек и заслонок, направляющих аппаратов турбин и насосов, шлагбаумов и других устройств);
- элементов следящих систем (копировальных станков, манипуляторов, автокомпенсационных, регулирующих и других устройств);
- рулевых устройств транспортных объектов;
- особых элементов систем управления (противовесов в грузоподъемных сооружениях, зажимных автоматических устройств и т. п.).

К числу *контрольных элементов* исполнительных механизмов относятся:

- механизм обратной связи, определяющий характеристику регулятора, либо обеспечивающий передачу сигнала на дистанционный указатель положения исполнительного механизма;
- концевые или путевые выключатели, которые останавливают исполнительный механизм в крайних, а иногда и промежуточных положениях (например, трехпозиционный исполнительный механизм), и концевые выключатели, в некоторых случаях выполняющие сигнальные функции;
- измеритель вращающего момента на выходной оси исполнительного механизма, обеспечивающий выключение двигателя или его проскальзывание в специальной муфте после достижения предельно допустимого момента, что необходимо для получения запорного или зажимного действия исполнительного механизма или предохранения его от аварий в случае попадания под управляемое устройство посторонних предметов;
- тормозное устройство при быстроходных двигателях для борьбы с инерцией в момент остановки;
- защелка с выключателем главного соленоида и спускное расцепляющее устройство в исполнительном механизме с соленоидами большой мощности.

В большинстве электрических исполнительных механизмов мощность электродвигателей 10...1 000 Вт. Пневматические исполнительные механизмы работают при давлениях до 0,6 МПа, а гидравлические – до 3 МПа. В некоторых случаях мощность исполнительных механизмов достигает десятков киловатт, а давление – 10 МПа. Исполнительные механизмы обычно развивают на выходном валу вращающий момент от 1 до 100 Н м при числе рабочих оборотов от 0,25 до 30 с<sup>-1</sup> либо усилие от 100 до 5 000 Н при ходе от 25 до 750 мм.

В приборах точной механики применяют исполнительные механизмы с меньшими вращающими моментами и переставляющими усилиями. Время перестановки устройства управляемого исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое обычно находится в пределах 5...120 с. Время перестановки более 120 с можно увеличить с помощью регуляторов



прерывистого (шагового) действия, чтобы не усложнять чрезмерно редуктор. Время перестановки соленоидных, а также дозирующих и аварийных исполнительных механизмов доходит до долей секунд.

*Исполнительный механизм электрический* – исполнительный механизм, в котором перемещение регулирующего органа производится за счет электрической энергии. Электрические исполнительные механизмы бывают двух основных типов:

- с приводом от электродвигателя (наиболее широко распространены в схемах общепромышленной автоматики);
- с приводом от электромагнита (обычно соленоида).

В электрических исполнительных механизмах применяются асинхронные двигатели. Для исполнительных устройств малой мощности – двухфазные с короткозамкнутым или полым ротором, для более мощных – трехфазные с короткозамкнутым или массивным ротором. Для уменьшения выбега двигателя и улучшения качества регулирования используется электрическое торможение или электромагнитные тормоза, которые накладываются при снятии с двигателя напряжения питания.

Управление электрическим исполнительным механизмом с помощью соответствующих обратных связей можно построить так, чтобы перемещение регулирующего органа или скорость его движения изменялись пропорционально сигналу управления.

Конструктивно электродвигательные исполнительные механизмы выполняются, как правило, с вращательным движением выходного вала и режес с поступательным перемещением выходного штока. В системах общепромышленной автоматики для привода заслонок, кранов, шиберов и других устройств наиболее часто применяются однооборотные электрические исполнительные механизмы, в которых поворот выходного вала составляет 120...170°. С помощью многооборотных электрических исполнительных механизмов обычно перемещаются такие регулирующие органы, как запорные вентили и задвижки.

Блок-схема электродвигательного исполнительного механизма представлена на рис. 94.

Она работает следующим образом. Двигатель Д через редуктор Р перемещает регулирующий орган РО. Сигнал  $U_c$ , поступающий на вход электрического исполнительного механизма, имеет обычно недостаточную мощность для управления двигателем, поэтому он предварительно усиливается усилителем У. Концевые выключатели КВ служат для ограничения перемещения РО. Оператор может устанавливать РО с помощью устройства дистанционного управления ДУ, контролируя его положение прибором П, а при неисправности ДУ – штурвалом ручного управления РУ. Датчики обратной связи по положению ОСП, выполняемые в виде потенциометров, индуктивных датчиков или линейных индукционных потенциометров, и датчики обратной связи по скорости ОСС, выполняемые в виде тахогенера-

торов постоянного или переменного тока, служат для ввода дополнительных сигналов, необходимых для получения требуемых характеристик от электрического исполнительного механизма.

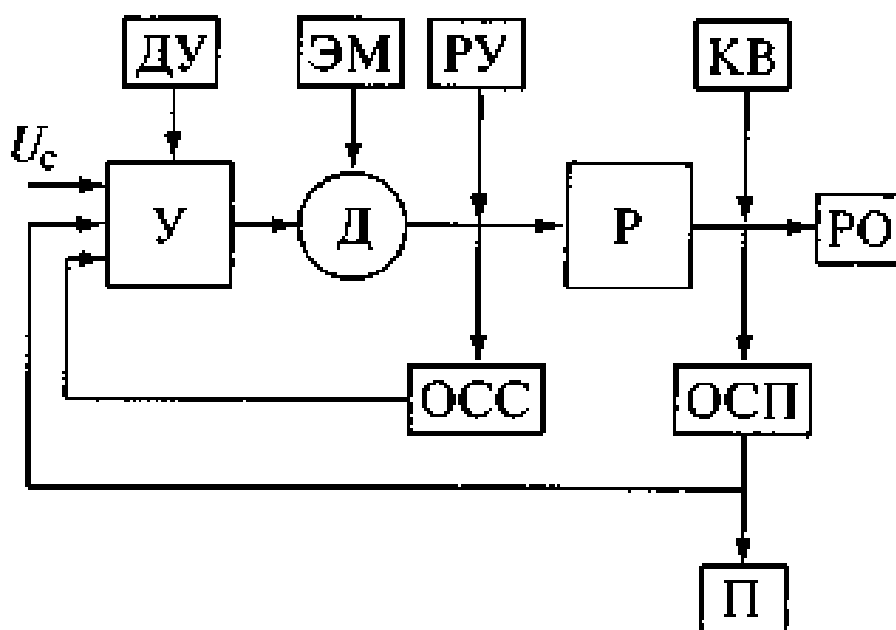


Рис. 94. Блок-схема электродвигательного исполнительного механизма:  
 Д – двигатель; Р – редуктор; РО – регулирующий орган; У – усилитель;  
 КВ – конечный выключатель; ДУ – устройство дистанционного управления;  
 ЭМ – электромагнит; ОСС, ОСП – датчики обратной связи соответственно  
 по скорости и положению; П – контрольный прибор

Номинальный момент  $M$  на выходном валу и время  $T$  полного оборота выходного вала, т. е. быстродействие, являются основными характеристиками электродвигательного исполнительного механизма.

Мощность на валу двигателя  $P$ , необходимая для обеспечения заданных времени  $T$  и момента  $M$ , определяется по формуле

$$P = \frac{61,5M}{T\eta},$$

где  $\eta$  – КПД редуктора.

Инерционность привода электрического исполнительного механизма, определяемая временем от начала движения регулирующего органа до установления полной скорости, зависит от соотношения между пусковым моментом двигателя и моментом инерции привода. Пусковой момент обычно в 2...2,5 раза больше номинального. Важной характеристикой электрического исполнительного механизма является время запаздывания – время от момента подачи сигнала до начала вращения выходного вала.

## Исполнительные устройства и механизмы

**Исполнительное устройство** – это одно из звеньев автоматических систем регулирования, предназначенных для непосредственного воздействия на объект регулирования. В общем случае исполнительное устройство состоит из исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО). Исполнительные устройства, в зависимости от используемой энергии, подразделяются на следующие виды:

- пневматические с пневматическим ИМ;
- гидравлические с гидравлическим ИМ;
- электрические с электрическим ИМ;
- электропневматические с пневматическим ИМ и электропневматическим преобразователем;
- электрогидравлические с гидравлическим ИМ и электрогидравлическим преобразователем;
- пневмогидравлические с гидравлическим ИМ и пневмогидравлическим преобразователем.

Исполнительный механизм является приводной частью регулирующего органа. Применяются ИМ следующих видов:

- электрические (электромагнитные и электродвигательные);
- пневматические (мембранные, поршневые и лопастные);
- гидравлические (прямоходные и кривошипные).

**Регулирующим органом (РО)** называется звено исполнительного устройства, предназначенное для изменения расхода вещества или энергии в объект регулирования. Различают дозирующие и дроссельные РО. К дозирующим относятся такие устройства, которые изменяют расход вещества за счет изменения производительности агрегатов (дозаторы, питатели, насосы, компрессоры, плужковые сбрасыватели и др.). Дроссельный РО представляет собой переменное гидравлическое сопротивление, изменяющее расход вещества за счет изменения своего проходного сечения; к ним относятся регулирующие клапаны, поворотные заслонки, шиберы и краны. Регулирующие органы характеризуются многими параметрами, основными из которых являются: пропускная и условная пропускная способности, условное и рабочее давление, перепад давления на РО и условный проход.

**Пропускной способностью  $K_v$**  называется расход жидкости с плотностью  $1\ 000\ \text{кг/м}^3$ , пропускаемой РО при перепаде давления на нем  $10^5\ \text{Па}$ . Пропускная способность измеряется в кубических метрах в час ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

**Условной пропускной способностью  $K_{vy}$**  называется номинальное значение пропускной способности РО при максимальном (условном) ходе затвора, выраженное в кубических метрах в час ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Условная пропускная способность зависит от типа РО и размера его условного прохода  $D_y$ .

**Условным давлением  $P_y$**  называется наибольшее допустимое давление среды на РО при нормальной температуре. Прочность металлов с по-

вышением температуры понижается. Поэтому для арматуры и соединительных частей предусматривается также максимальное рабочее давление.

**Максимальное рабочее давление** – это наибольшее установленное давление среды на РО при фактической температуре. Рабочее давление при одном и том же условном давлении зависит от свойств металла деталей РО и температуры среды. Разрешается превышение фактического рабочего давления до 5 % сверх установленного для заданной температуры.

**Перепад давления** на РО определяет усилия, на которые рассчитывают ИМ, а также износ дроссельных поверхностей. Для многих видов исполнительных устройств, в которых затвор не разгружен от статического и динамического воздействий среды, предельно допустимый перепад давления устанавливается в зависимости от мощности ИМ.

**Условным проходом  $D_y$**  в РО называется номинальный диаметр прохода в присоединительных патрубках. Стандартные размеры условных проходов не распространяются на размеры прохода внутри корпуса.

Кроме приведенных параметров РО, определяющих в основном их конструкцию и размеры, имеются и другие параметры, которые учитывают при выборе РО в зависимости от конкретных условий их применения.

**Пропускная характеристика** (внутренняя или идеальная) устанавливает зависимость пропускной способности относительно перемещения затвора  $S$  при постоянном перепаде давления

$$K_0 = f(S).$$

**Конструктивная характеристика** устанавливает зависимость изменения относительно проходного сечения РО от степени его открытия, т. е.

$$F_s/F_{max} = F(S),$$

где  $f(S)$  – площадь проходного сечения при перемещении  $S$  РО;  $F_{max}$  – проходное сечение РО при полном открытии. При соответствующем профилировании дроссельные устройства регулирующих клапанов могут иметь любые конструктивные характеристики, приспособленные к конкретным условиям работы автоматических систем регулирования. Дроссельные устройства серийно выпускаемых регулирующих клапанов профилируются обычно с линейной или равнопроцентной пропускной характеристикой.

При линейной пропускной характеристике приращение пропускной способности пропорционально перемещению затвора:

$$dK_v = CdS,$$

где  $C$  – постоянная величина.

При равнопроцентной пропускной характеристике приращение пропускной способности при перемещении затвора пропорционально текущему значению пропускной способности:  $dK_v / dS = CK_v$ .

Регулирующие заслонки относятся к непрофилирующим РО и имеют пропускные характеристики, близкие к равнопроцентным. На рис. 95 пока-

заны зависимости относительной пропускной способности  $K_v/K_{vy}$  от степени открытия РО  $S$  для линейной и равнопроцентной пропускных характеристик РО, а также для пропускной характеристики регулирующей заслонки.

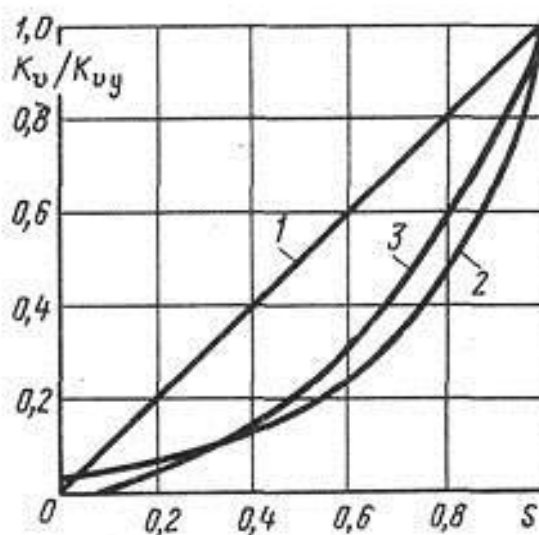


Рис. 95. Пропускные характеристики дроссельных РО:  
1 – линейная; 2 – равнопроцентная; 3 – регулирующей заслонки

**Расходная характеристика.** В рабочих условиях вид пропускной характеристики изменяется в зависимости от изменения перепада давлений на клапане. При этом РО характеризуются расходной характеристикой, которая представляет собой зависимость относительного расхода среды от степени открытия

$$\text{РО } \mu = f(S),$$

где  $\mu = Q/Q_{\text{макс}}$  – относительный расход среды;  $Q$  – расход среды при степени открытия РО  $\mu$ ;  $Q_{\text{макс}}$  – расход среды при полностью открытом РО.

**Минимальной пропускной способностью  $K_{v\text{мин}}$**  называется наименьшее значение пропускной способности, при котором сохраняется пропускная характеристика в пределах установленного допуска; оно определяется как расход среды с плотностью  $1\ 000\ \text{кг/м}^3$ , пропускаемой РО при перепаде давления на нем  $10^5\ \text{Па}$ .

Во многих случаях автоматизации производственных процессов РО должны иметь широкий **диапазон изменения пропускной способности**, которым называется отношение условной пропускной способности  $K_{vy}$  к минимальной пропускной способности.

**Негерметичность затвора**, т. е. пропуск среды при полностью закрытом проходе, также является характеристикой РО. Для надежного и качественного регулирования негерметичность затвора должна быть минимальной.

Общие требования к РО зависят от физико-химических свойств регулируемой среды. Материал РО, контактирующий со средой, должен быть стойким к химическому воздействию среды. Коррозия уплотнительных дроссельных и направляющих поверхностей затворов, седел и штоков недопустима.

Регулирующий орган должен надежно работать при регулировании среды с высокой или низкой температурой. Недопустимы отказы в работе из-за загрязнений, отложений и т. д. В РО для сред с высокой температурой необходимо предусматривать, чтобы температура сальниковой набивки, уплотняющей шток, не поднималась выше допустимой температуры для смазки, которая добавляется в набивку. Для понижения температуры в зоне сальника между ним и фланцем крышки помещают ребристую трубу. При регулировании среды с отрицательной температурой необходимо предусматривать защиту от обмерзания части штока РО, выступающей из сальниковой камеры, или применение РО специальной конструкции. При необходимости РО должен удовлетворять условиям пожаро- и взрывобезопасности, т. е. необходимо исключить проникновение регулируемой среды наружу. В этих случаях применяют сильфонные бессальниковые уплотнения штоков.

### **Промежуточное тестирование**

1. Назначение и основная классификация исполнительных элементов.
2. Исполнительное устройство: определение, классификация.
3. Регулирующий орган: назначение, классификация.

БГАРФ

## ГЛАВА 11. Исполнительные двигатели постоянного и переменного тока: разновидности, характеристики и особенности управления

### Исполнительные двигатели постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока, так же как исполнительные асинхронные двигатели, применяются в системах автоматики для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение. Помимо обычных требований, предъявляемых к электродвигателям общего назначения, к исполнительным двигателям предъявляется ряд специфических требований, из которых основными являются отсутствие самохода и малоинерционность.

Почти все исполнительные двигатели (исключение составляют лишь двигатели с постоянными магнитами) имеют две обмотки. Одна из них постоянно подключена к сети и называется *обмоткой возбуждения*, на другую – *обмотку управления* электрический сигнал подается лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение вала. От напряжения управления зависят частота вращения и вращающий момент исполнительного двигателя, а следовательно, и развиваемая им механическая мощность.

Исполнительные двигатели постоянного тока по конструкции отличаются от двигателей постоянного тока общего назначения только тем, что имеют шихтованные (набранные из листов электротехнической стали) якорь, станину и полюсы, что необходимо для работы исполнительных двигателей в переходных режимах. Магнитная цепь исполнительных двигателей не насыщена, поэтому реакция якоря практически не влияет на их рабочие характеристики.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока в настоящее время используют чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже – двигатели с постоянными магнитами. У двигателей с независимым возбуждением в качестве обмотки управления используют либо обмотку якоря – двигатели с якорным управлением, либо обмотку полюсов – двигатели с полюсным управлением.

У исполнительных двигателей с якорным управлением обмоткой возбуждения является обмотка полюсов, а обмоткой управления – обмотка якоря (рис. 96, а). Обмотку возбуждения подключают к сети с постоянным напряжением  $U_B$  на все время работы автоматического устройства. На обмотку управления подают сигнал (напряжение управления) лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря двигателя. От напряжения управления зависят вращающий момент и частота вращения двигателя. При изменении полярности напряжения управления меняется направление вращения якоря двигателя.

У исполнительных двигателей с полюсным управлением обмоткой управления является обмотка полюсов, а обмоткой возбуждения – обмотка якоря (рис. 96, б). Якорь двигателя постоянно подключен к сети с напряжением  $U_B = \text{const}$ . Для ограничения тока иногда последовательно с якорем включают добавочное (балластное) сопротивление  $R_d$ . На обмотку полюсов напряжение управления  $U_y$ , (сигнал) подают лишь тогда, когда необходимо вызвать вращение якоря.

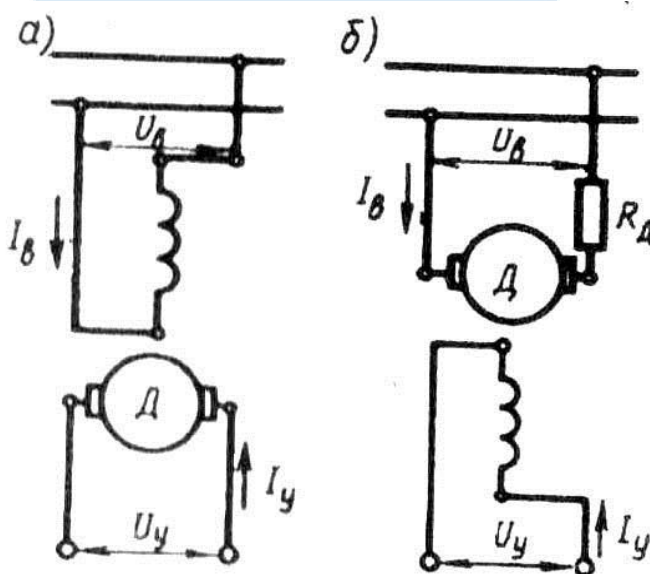


Рис. 96. Схема включения исполнительных двигателей постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока обычной конструкции имеют существенный недостаток – замедленность переходных процессов, т. е. отсутствие малоинерционности. Объясняется это в основном двумя причинами: наличием массивного якоря со стальным сердечником, обладающим значительным моментом инерции, и значительной индуктивностью  $L_y$  обмотки якоря, уложенной в пазы сердечника якоря. Последняя причина способствует увеличению электромагнитной постоянной времени  $T = L_y / \Sigma r$ . Указанные недостатки отсутствуют в двигателях с гладким (полюсным) якорем (рис. 97). Станина (1) и полюсы (3) этого двигателя обычные. Возбуждение двигателя осуществляется либо с помощью обмотки возбуждения (2), либо постоянными магнитами.

Для уменьшения момента инерции якоря его обмотка отделена от массивного ферромагнитного сердечника, последний выполнен неподвижным (внутренний статор (5)) и расположен на цилиндрическом выступе подшипникового щита (6).

Обмотка якоря в процессе изготовления укладывается на цилиндрический каркас, а затем заливается пластмассой. Готовый якорь (4) представляет



собой полый стакан, состоящий из проводников обмотки, связанных воедино пластмассой. Концы секций обмотки, как и в обычном двигателе, соединяются с пластинами коллектора, который является частью дна полого стакана якоря (4). Вращающийся узел двигателя с гладким якорем состоит из вала, коллектора и обмотки якоря, залитой пластмассой.

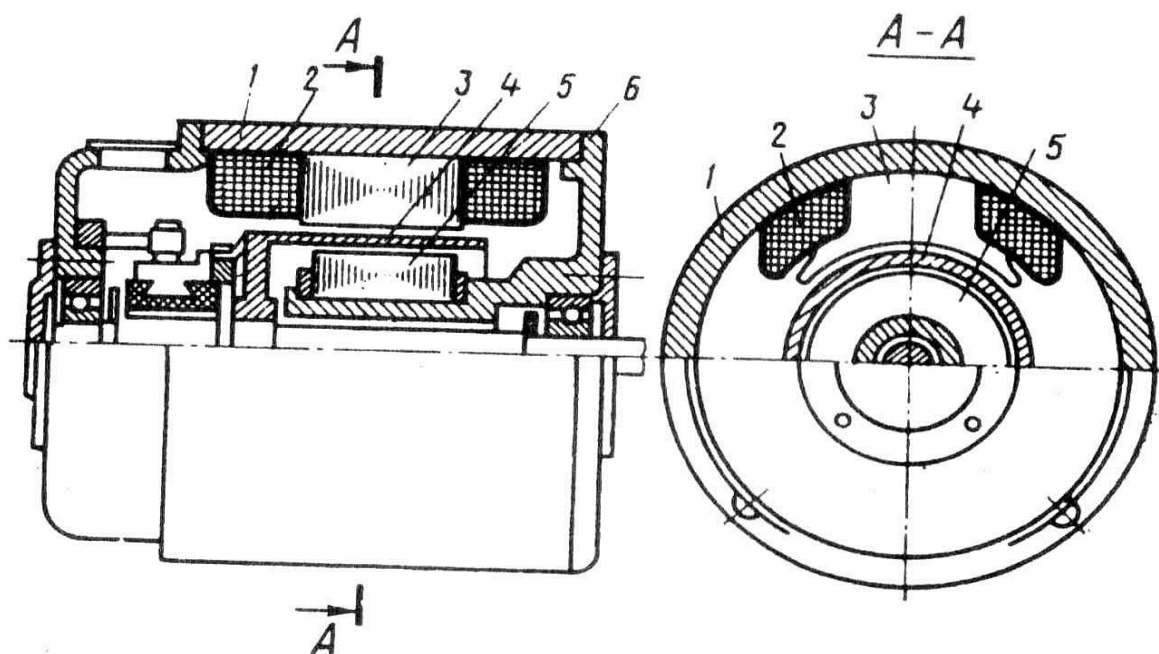


Рис. 97. Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока с полым якорем:

1 – станина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюсы; 4 – якорь;  
5 – внутренний статор; 6 – подшипниковый щит

Момент инерции полого якоря значительно меньше момента инерции обычного якоря, что обеспечивает хорошее быстродействие двигателя. Кроме того, индуктивность обмотки якоря снижается, что также способствует повышению быстродействия двигателя. К тому же снижение индуктивности обмотки улучшает коммутацию двигателя за счет уменьшения реактивной ЭДС.

Недостаток рассмотренного малоинерционного двигателя с полым якорем – наличие большого немагнитного промежутка между полюсами статора и неподвижным ферромагнитным сердечником – внутренним статором. Этот промежуток складывается из двух воздушных зазоров и толщины стакана якоря (толщины слоя обмотки якоря). Наличие большого немагнитного промежутка на пути магнитного потока требует значительного увеличения МДС возбуждения, что приводит, во-первых, к увеличению габаритов двигателя из-за увеличения объема обмотки возбуждения, а во-вторых, к росту потерь на нагрев обмотки возбуждения. Однако КПД двигателя с полым якорем вследствие отсутствия потерь в стальном сердечнике

якоря практически находится на том же уровне, что и в обычных двигателях, а в случае применения для возбуждения постоянных моментов значительно превосходит КПД последних.

К *положительным качествам* исполнительных двигателей постоянного тока относятся следующие:

- возможность получения теоретически любых, сколь угодно малых и больших частот вращения;
- возможность простого, плавного, экономичного и в широком диапазоне регулирования частоты вращения;
- устойчивость работы практически при любых частотах вращения;
- линейность механических, а в ряде случаев и регулировочных характеристик;
- отсутствие самохода;
- значительный пусковой момент;
- сравнительно небольшая электромеханическая постоянная времени;
- малые габаритные размеры и масса (значительно меньшие, чем у исполнительных двигателей переменного тока).

Основным *недостатком* наиболее широко распространенных коллекторных (контактных) исполнительных двигателей постоянного тока, ограничивающим области их применения, является наличие скользящих контактов – коллектора и щеток.

Непостоянство переходного сопротивления скользящих контактов приводит к нестабильности характеристик двигателя. Искрение под щетками приводит к подгоранию контактов коллектора и щеток, т. е. обуславливает необходимость систематического ухода за ними и недопустимость установки двигателей обычного использования во взрывоопасных помещениях. Коллектор и щетки являются источниками радиопомех, для подавления которых требуются специальные фильтры.

Коллекторные исполнительные двигатели имеют механический коллектор и щетки. Причем различают двигатели с ферромагнитными шихтованными (массовыми) якорями, имеющими пазы, или с гладкими (беспазовыми) якорями и малоинерционные двигатели, якоря которых не имеют магнитных магнитопроводов.

По способу возбуждения коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока могут быть с электромагнитным возбуждением (рис. 98) и возбуждением от постоянных магнитов.

У двигателей с электромагнитным возбуждением в качестве обмотки управления используется либо обмотка якоря – двигатели с якорным управлением (рис. 99, *а*), либо обмотка полюсов – двигатели с полюсным управлением (рис. 99, *б*). У двигателей, возбуждаемых постоянными магнитами, обмоткой управления является единственная их обмотка – обмотка якоря, поэтому они всегда работают при якорном управлении.

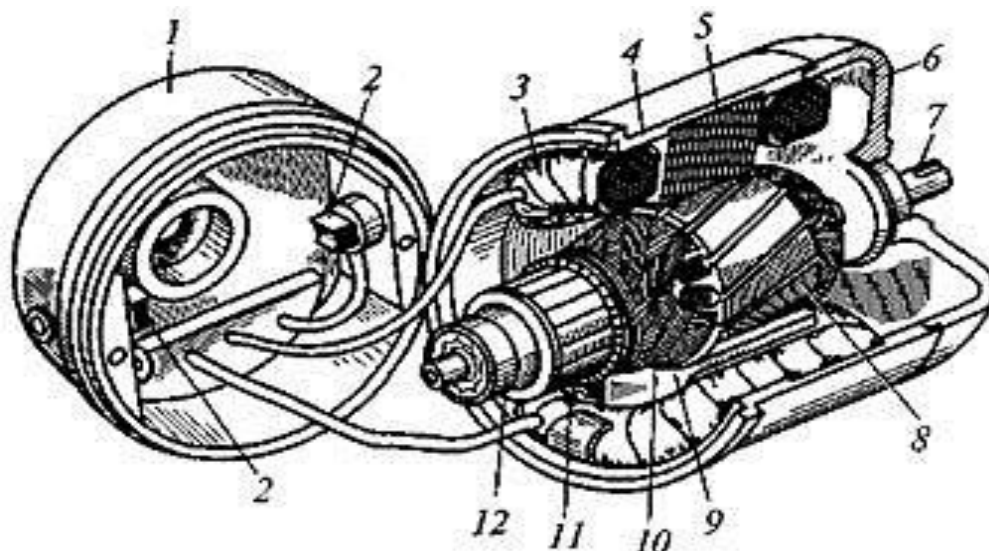


Рис. 98. Исполнительный коллекторный двигатель постоянного тока:  
 1 – передний подшипниковый щит; 2 – щетки; 3 – обмотка полюса; 4 – корпус;  
 5 – статор в разрезе; 6 – задний подшипниковый щит; 7 – вал; 8 – сердечник  
 якоря; 9 – полюс; 10 – обмотка якоря; 11 – коллектор;  
 12 – шариковый подшипник

В схемах автоматики широко используются также бесконтактные двигатели постоянного тока, основные характеристики которых аналогичны характеристикам коллекторных исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением.

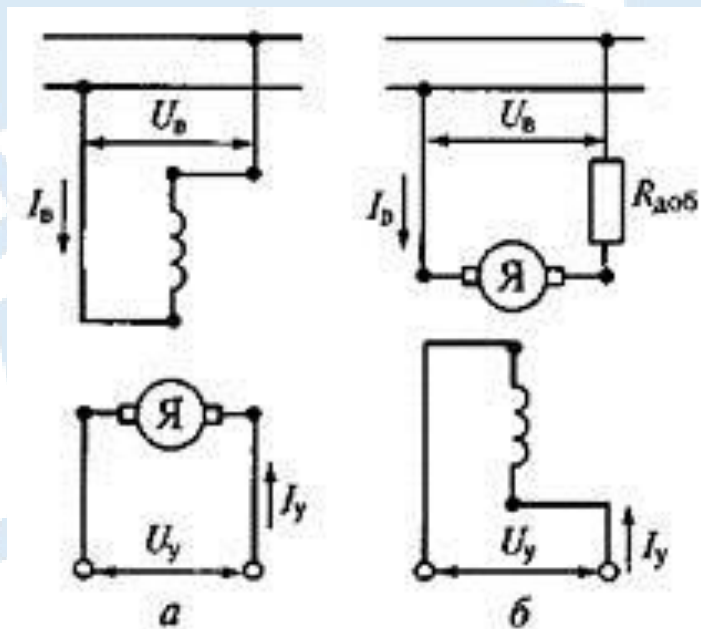


Рис. 99. Схемы включения исполнительных двигателей постоянного тока:  
 а – якорное управление; б – полюсное управление

По конструкции коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока можно разделить на:

- двигатели с якорем обычного исполнения (с полузакрытыми пазами на его цилиндрической поверхности);
- двигатели с гладким якорем, у которых обмотка якоря расположена на шихтованном гладком цилиндрическом ярме и укреплена с помощью эпоксидных смол и бандажей;
- двигатели с малоинерционными якорями (цилиндрическими и дисковыми), у которых во время работы вращается лишь обмотка якоря с коллектором, а ярмо якоря остается неподвижным.

*Особенностью* исполнительных двигателей постоянного тока с изменяющимся по значению магнитным потоком возбуждения (в отличие от обычных силовых двигателей) является то, что они имеют шихтованные (набранные из тонких листов электротехнической стали) не только магнитопровод якоря, но и спинку статора и полюсы, что необходимо для уменьшения постоянной времени при быстром изменении магнитного потока, а также потерь в магнитопроводе при работе двигателя в переходных режимах, которые являются обычными для исполнительных двигателей.

По габаритным размерам и массе двигатели постоянного тока в два-три раза меньше асинхронных исполнительных двигателей той же мощности, но в то же время они больше обычных силовых двигателей постоянного тока. Последнее объясняется тем, что во-первых, магнитная цепь исполнительных двигателей, как правило, менее насыщена, что вызвано желанием получить линейные характеристики и устранить влияние на них поля реакции якоря, во-вторых, меньшими плотностями токов в обмотках, что диктуется желанием уменьшить их перегрев. Последнее очень важно, так как исполнительные двигатели постоянного и переменного токов никогда не снабжаются встроенными вентиляторами, которые, во-первых, малоэффективны (так как исполнительные двигатели практически никогда не работают при постоянных значительных частотах вращения, а работают в режимах пусков, остановок, реверсов); во-вторых, вследствие значительной инерционности вентиляторы увеличивают постоянную времени двигателя, снижая его быстродействие.

Несмотря на ряд существенных *недостатков*, связанных с наличием скользящего контакта между щеткой и коллектором, исполнительные двигатели постоянного тока широко используются в системах автоматического управления, регулирования и контроля, поскольку обладают и рядом *положительных* качеств, в частности такими как:

- плавное, широкое и экономичное регулирование частоты вращения;
- практическое отсутствие ограничений на максимальную и минимальную частоту вращения;
- большие пусковые моменты; хорошая линейность механических, а при якорном управлении и регулировочных характеристик.

Как и любые исполнительные двигатели, эти имеют две обмотки: обмотку возбуждения и обмотку управления. При этом напряжение управления может подаваться либо на обмотку якоря, либо на обмотку возбуждения. Поэтому различают якорное и полюсное управление.

### Якорное управление исполнительным двигателем

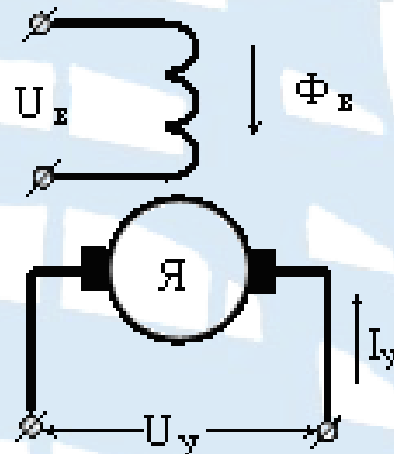


Рис. 100. Схема включения исполнительного двигателя при якорном управлении

Схема включения двигателя с якорным управлением показана на рис. 100. Напряжение возбуждения подается на обмотку полюсов, напряжение управления – на обмотку якоря. Коэффициент сигнала  $\alpha$  здесь равен  $\alpha = U_\gamma / U_B$ . Для двигателей с постоянными магнитами  $\alpha = U_\gamma / U_{\gamma, \text{ном}}$ . Регулирование частоты вращения осуществляется изменением напряжения управления.

При отсутствии насыщения  $\Phi_B = k_\phi U_B$ , а поскольку  $U_B = \text{const}$ , магнитный поток возбуждения также остается постоянным, т. е.  $\Phi_B = \text{const}$ .

Ток якоря

$$I_\gamma = (U_\gamma - E) / r_a = (\alpha U_B - c_e k_\phi U_B n) / r_a,$$

где  $E = c_e \Phi_B n = c_e k_\phi U_B n$  – ЭДС якоря;  $r_a$  – сопротивление якорной цепи.

Вращающий момент двигателя

$$M = c_m \Phi_B I_\gamma = (c_m k_\phi \alpha U_B^2 - c_m c_e k_\phi^2 U_B^2 n) / r_a.$$

Выразим момент в относительных единицах, приняв за базовый момент пусковой момент, развиваемый двигателем при  $n = 0$  и  $\alpha = 1$

$$M_6 = M_\Pi = c_m \Phi_B I_\gamma = c_m c_e k_\phi U_B^2 / r_a.$$

Тогда относительное значение момента  $m = M / M_6$

$$m = \alpha - c_e k_\phi n. \tag{1}$$

Частота вращения при холостом ходе ( $m = 0$  и  $a = 1$ )

$$N_0 = 1/c_e k_\phi. \quad (2)$$

Откуда находим  $c_e k_\phi = 1/n_0$ . Подставляя это значение в (1), получим

$$m = \alpha - v, \quad (3)$$

где  $n = n/n_0$  – относительная частота вращения двигателя.

$$v = \alpha - m. \quad (4)$$

Уравнение (3) есть уравнение **механической характеристики** исполнительного двигателя при якорном управлении. Решив его относительно  $n$ , получим уравнение **регулировочной характеристики**.

*Механическая мощность* в относительных единицах  $p_{\text{мх}} = mn = n(a - n)$ . Угловую скорость, при которой наступает максимум мощности, найдем известным приемом ( $dp_{\text{мх}}/dn = 0$ ), откуда  $n_m = a/2$ , а максимальное значение механической мощности будет

$$P_{\text{мх.макс}} = \alpha^2/4.$$

$$P_y = U_y I_y = \alpha U_B^2 / r_a (\alpha - v).$$

*Мощность управления*

Приняв за базовую единицу мощность управления при коротком замыкании  $P_{y.k}$  ( $n = 0$ ,  $a = 1$ )

$$P_{y.k} = U_B^2 / r_a,$$

$P_y = \alpha^2 - \alpha v$ , получим мощность управления в относительных единицах

*Мощность возбуждения*

$$P_B = U_B I_B = U_B^2 / r_B.$$

На рис. 6, а представлены механические, на рис. 101, б – регулировочные характеристики, а на рис. 102 показана зависимость  $p_{\text{мх}} = f(n)$  исполнительного двигателя. Проанализируем свойства двигателя при якорном способе управления.

*Механические характеристики* линейные и параллельные, что означает независимость быстродействия от коэффициента сигнала. Пусковой момент и угловая скорость холостого хода пропорциональны коэффициенту сигнала.

*Регулировочные характеристики* линейные. Напряжение трогания пропорционально моменту нагрузки. Линейность механических и регулировочных характеристик является важным достоинством якорного управления.

*Мощность управления* резко возрастает с увеличением коэффициента сигнала. Кроме того, она доходит до 95 % полной потребляемой мощности двигателя, поскольку является мощностью якорной цепи, что характерно для двигателей постоянного тока.

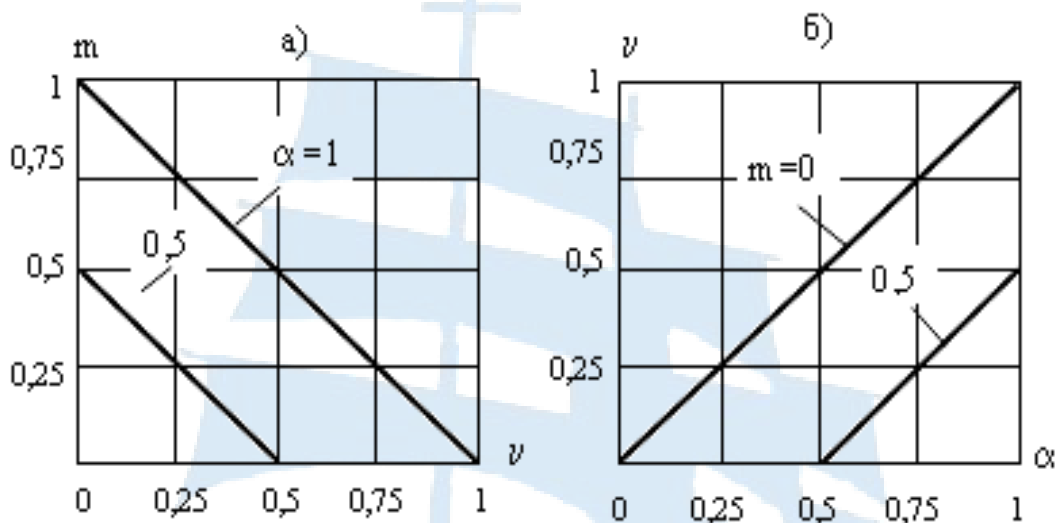


Рис. 101. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении

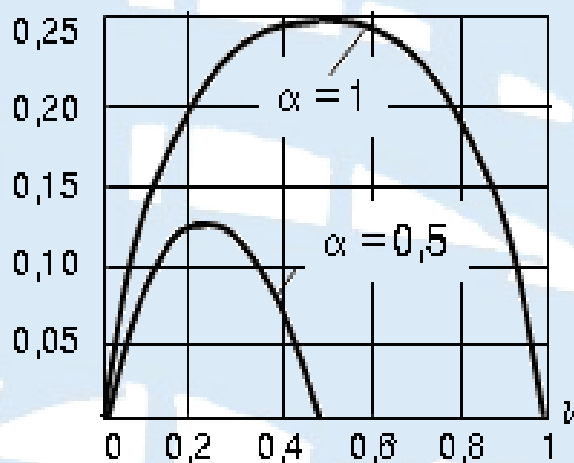


Рис. 102. Зависимость механической мощности от скорости вращения при якорном управлении

В данном случае это является существенным недостатком якорного управления, ибо предполагает наличие мощных и дорогих усилителей.

Мощность возбуждения остается величиной постоянной, независящей ни от коэффициента сигнала, ни от частоты вращения. К тому же она – небольшая по величине, что также характерно для машин постоянного тока.

Максимум механической мощности в сильной степени зависит от коэффициента сигнала и даже при  $\alpha = 1$  не превышает  $1/4$  базовой мощности.

## Полюсное управление исполнительным двигателем

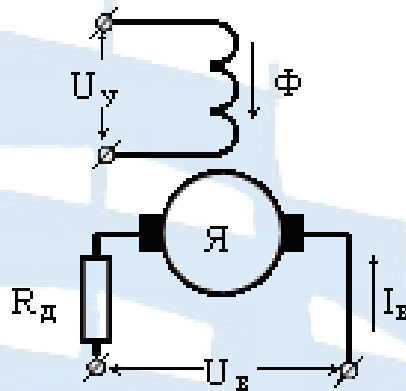


Рис. 103. Схема включения исполнительного двигателя при полюсном управлении

Схема управления приведена на рис. 103. Напряжение управления подается на обмотку главных полюсов, напряжение возбуждения – на обмотку якоря, по которой в течение всего времени работы двигателя протекает ток возбуждения. В двигателях мощностью более 10 Вт для его ограничения включают дополнительное сопротивление  $R_d$ .

Если пренебречь насыщением магнитной цепи, можно считать

$$\Phi = k_\Phi U_y = k_\Phi a U_B.$$

Тогда ток якоря

$$I_B = (U_B - E)/r_a = (U_B - c_e k_\Phi \alpha U_B n)/r_a.$$

Вращающий момент

$$M = c_M \Phi I_B = c_M k_\Phi U_B^2 \alpha (1 - \alpha c_e k_\Phi n)/r_a.$$

Принимая за базовый момент пусковой ( $n = 0, a = 1$ )

$$M_0 = M_\Pi = c_M k_\Phi U_B^2 / r_a,$$

получим относительное значение момента

$$m = \alpha (1 - \alpha c_e k_\Phi n).$$

С учетом (2) уравнение механической характеристики примет вид  $m = \alpha - \alpha^2 v$ .

Решив его относительно  $n$ , получим уравнение регулировочной характеристики

$$N = (\alpha - m)/\alpha^2.$$

Механическая мощность в относительных единицах  $p_{мх} = mn = \alpha n - \alpha^2 n^2$ . Скорость, при которой наступает максимум мощности  $n_M = 0,5/\alpha$ . Тогда максимальная механическая мощность будет

$$P_{мх.макс} = 1/4.$$



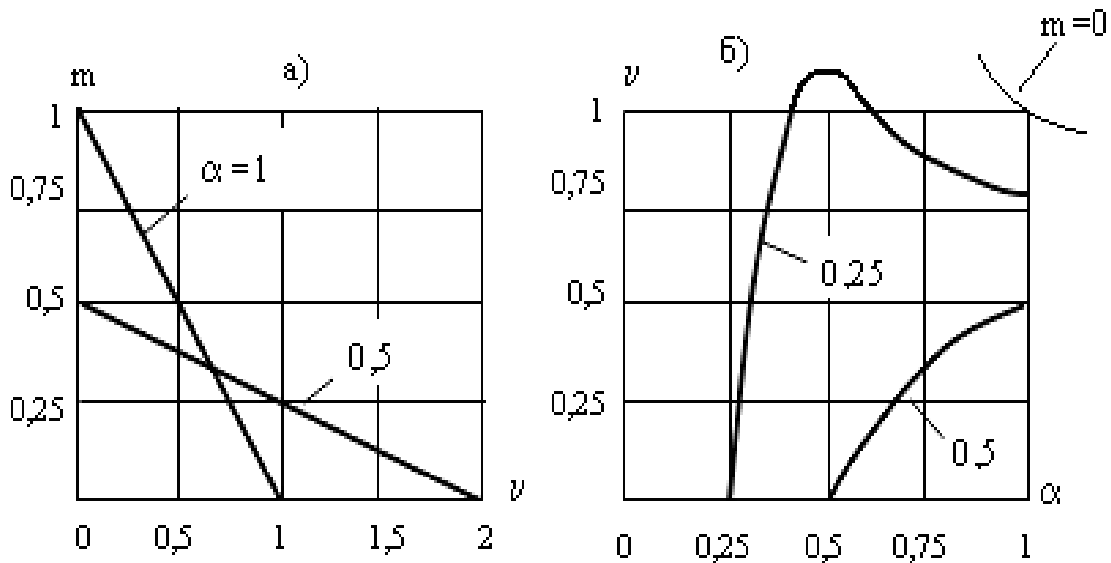
*Мощность управления*

$$P_v = U_v^2 / r_v = \alpha^2 U_B^2 / r_v.$$

*Мощность возбуждения*  $p_b = U_B I_B$ . Подставляя значение тока, получим

$$P_B = U_B^2 (1 - \alpha v) / r_a.$$

На рис. 104, *а* представлены механические, на рис. 104, *б* – регулировочные характеристики, а на рис. 104 показана зависимость  $p_{мх} = f(n)$  исполнительного двигателя при полюсном управлении.



*Рис. 104. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при полюсном управлении*

Проанализируем эти графики.

*Механические характеристики* линейные, но непараллельные, к тому же и неоднозначные (одну и ту же частоту вращения можно получить при разных значениях *a*).

Пусковой момент прямо-, а частота вращения холостого хода обратно пропорциональны коэффициенту сигнала и при малых *a* может существенно превышать номинальную, что безусловно опасно для двигателя.

*Регулировочные характеристики* нелинейные, а при  $m < 0,5$  неоднозначные. По этой причине полюсное управление используют лишь при  $m > 0,5$ .

*Мощность управления* пропорциональна квадрату коэффициента сигнала и не зависит от частоты вращения. Она значительно меньше, чем при якорном управлении, что является достоинством данного способа.

*Мощность возбуждения* с увеличением частоты вращения уменьшается и тем быстрее, чем больше *a*.

*Максимум механической мощности* не зависит от коэффициента сигнала, что также можно отнести к достоинствам полюсного управления.

Несмотря на отмеченные достоинства полюсного управления, предпочтение все-таки следует отдать якорному потому, что оно обеспечивает линейные и однозначные характеристики, в принципе исключает самоход (при полюсном он возможен из-за взаимодействия тока якоря с потоком остаточной намагниченности полюсов), обладает более высоким быстродействием, поскольку индуктивность якоря меньше индуктивности обмотки возбуждения.

## **Основные типы двигателей переменного тока**

### *Асинхронные микродвигатели*

Самыми распространенными силовыми микродвигателями автоматики в настоящее время являются асинхронные двигатели. По своему устройству это двигатели с короткозамкнутым ротором, который чаще всего имеет обмотку, изготовленную в виде беличьей клетки. Реже ротор изготавливается массивным и полым из чугуна или стали, что делается либо для получения мягких механических характеристик, либо ради достижения особой механической прочности ротора, необходимой при высоких частотах вращения, либо с целью уменьшения акустического шума при работе двигателя. Асинхронные двигатели с фазовым ротором не выпускаются.

Классификация силовых асинхронных микродвигателей представлена на рис. 105.

В качестве силовых двигателей в схемах автоматики очень часто применяются трехфазные и однофазные асинхронные микродвигатели широкого применения, рассчитанные на работу от сети с частотой 50 Гц.

Так как механическая мощность асинхронного двигателя практически (при прочих равных условиях) прямо пропорциональна частоте питающего напряжения ( $P \sim Mn \sim Mn_c \sim M60 f/p \sim f$ ), а габаритные размеры определяются значением вращающего момента  $M$ , то в схемах автоматики очень часто применяют асинхронные двигатели, рассчитанные на работу от напряжений повышенной частоты  $f$ .

Применение асинхронных двигателей повышенной частоты в целом ряде случаев диктуется не только стремлением уменьшить габариты машины, но и рядом других соображений: необходимостью иметь более высокие угловые скорости вращения, работой автоматических систем от сетей повышенной частоты и др.

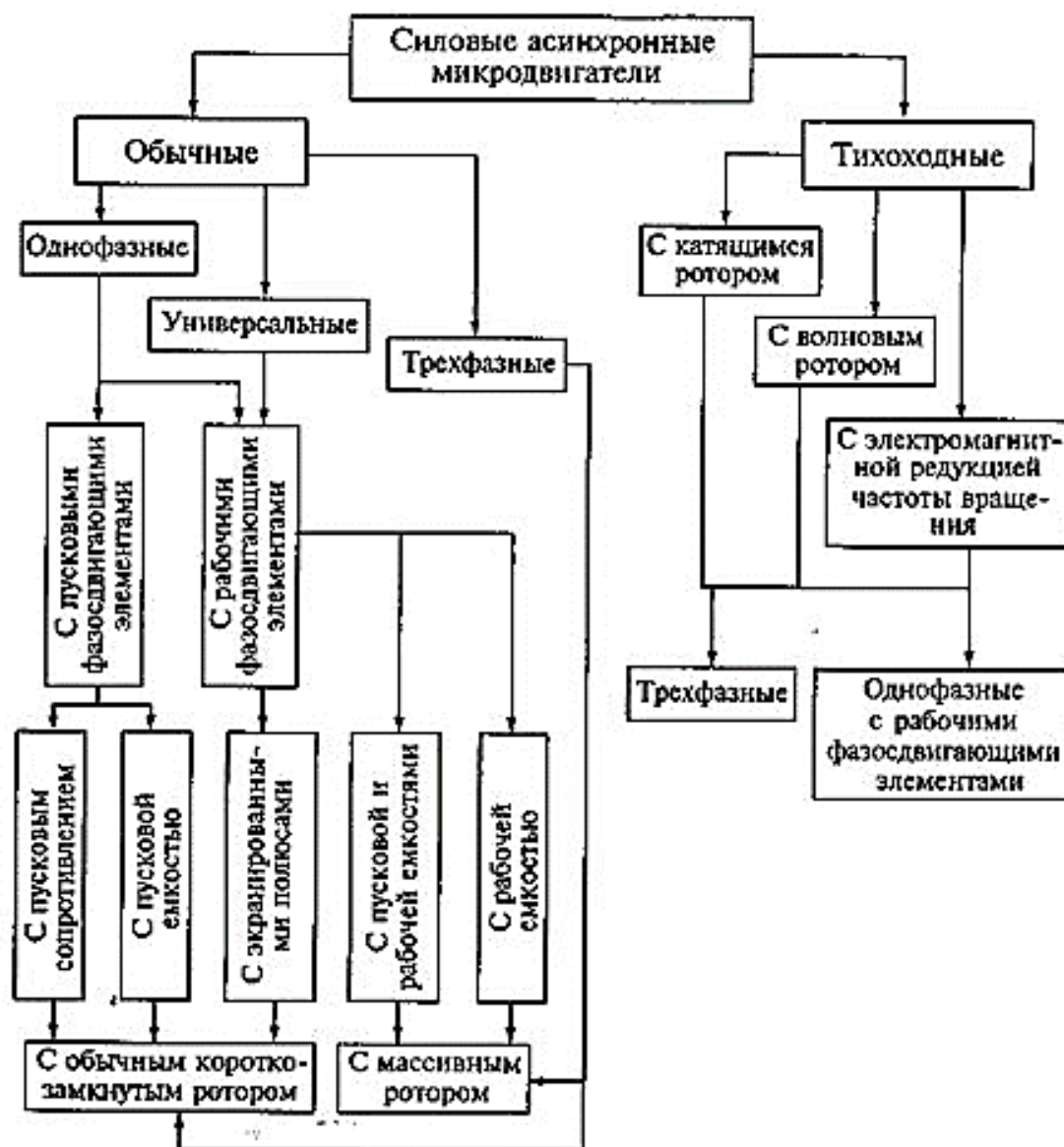


Рис. 105. Классификация силовых асинхронных микродвигателей

В ряде схем автоматики возникает обратная задача – необходимость получения малых частот вращения  $n$ . У асинхронных и синхронных двигателей переменного тока средних и больших мощностей этого можно легко достичь за счет увеличения числа пар полюсов  $p$ , так от этого зависит как синхронная частота вращения  $n_c$ :  $n_c = 60f/p$ .

Для двигателей малых мощности и габаритных размеров этот способ практически неприемлем, особенно если они рассчитаны на работу от сетей повышенной частоты. При малых габаритах увеличение числа пар полюсов  $p$ , а следовательно, и числа пазов двигателя весьма затруднительно, а иногда и невозможно.

С целью получения низких частот вращения приходится применять специальные тихоходные двигатели либо с электромагнитной редукцией частоты вращения, либо с катящимся или волновым роторами.

В большинстве схем автоматики силовые двигатели питаются не от трехфазных, а однофазных сетей переменного тока. Именно поэтому в качестве силовых в основном используются однофазные двигатели. Трехфазные двигатели в схемах автоматики используются значительно реже.

Однофазные асинхронные двигатели по своему устройству в подавляющем большинстве случаев являются двухфазными. Они, как правило, имеют на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Одна обмотка называется рабочей, или главной. Она подключается непосредственно к однофазной сети. Другая обмотка называется пусковой, или вспомогательной. Она подключается к однофазной сети через фазосдвигающий элемент либо только на время пуска, либо постоянно. В некоторых двигателях вспомогательная обмотка вообще не подключается к сети, а ЭДС в ней наводится потоком главной обмотки.

В зависимости от типа фазосдвигающего элемента, а также от способа использования вспомогательной (пусковой) обмотки силовые однофазные асинхронные (и синхронные) микродвигатели можно разделить на пять групп: с пусковым сопротивлением; пусковым конденсатором; пусковым и рабочим конденсатором; рабочим конденсатором; экранированными полюсами.

Кроме однофазных микродвигателей в системах автоматики в качестве силовых используются также универсальные асинхронные микродвигатели, которые, являясь по своему назначению трехфазными, при изменении схемы соединения обмоток – фаз и включении фазосдвигающих элементов могут работать и от однофазных сетей переменного тока.

### ***Синхронные микродвигатели***

Основной особенностью синхронных микродвигателей, определяющей области их применения, является постоянство частоты вращения при неизменной частоте питающей сети. Частота вращения ротора двигателя в синхронном режиме (при  $M_{сопр} < M_{тяж}$ ) не зависит от колебаний напряжения питания и момента сопротивления. Она равна частоте вращения магнитного поля, т. е. синхронной частоте вращения:  $n_c = 60 f / p$ .

В настоящее время в схемах автоматики синхронные микродвигатели применяются очень широко. По конструктивному исполнению они весьма разнообразны, особенно однофазные микродвигатели малых мощностей (от долей ватт до нескольких ватт).

Двигатели с номинальной мощностью от десятков до сотен ватт имеют обычное классическое исполнение. Они состоят из неподвижной части – статора, в пазах которого размещается трехфазная или двухфазная обмотка переменного тока, и вращающейся части – ротора, который у большинства двигателей имеет явно выраженные полюсы.

В зависимости от конструкции ротора различают синхронные микро-двигатели с электромагнитным возбуждением, постоянными магнитами, реактивные и гистерезисные. На рис. 106 представлены основные конструктивные схемы синхронных микродвигателей.

Кроме двигателей обычного исполнения в схемах автоматики иногда встречаются обращенные синхронные микродвигатели, обмотка переменного тока которых размещается в пазах ротора.

Микродвигатели с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения постоянного тока на полюсах) вследствие сложности их конструкций и пуска, а также необходимости наличия источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения в схемах автоматики применяются очень редко.

Синхронные микродвигатели выпускаются как на промышленную частоту 50 Гц, так и на повышенные частоты 400, 500, 1 000 Гц. Кроме обычных двигателей в схемах автоматики широко применяются тихоходные двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, работающие на зубцовых гармониках поля, и двигатели с катающимся или волновым роторами. Иногда для получения низких частот вращения используются обычные двигатели со встроенными редукторами.

Выпускаются несколько серий синхронных микродвигателей, которые широко применяются в приборах звуко- и видеозаписи, кино- и фотоаппаратуре, системах связи, всевозможных лентопротяжных устройствах и т. п.

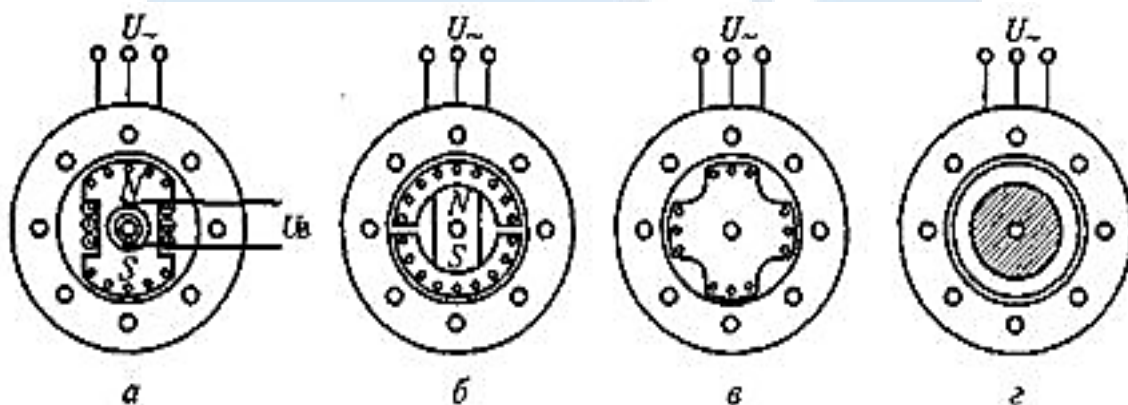


Рис. 106. Конструктивные схемы синхронных микродвигателей:  
 а – с электромагнитным возбуждением ( $2p = 2$ ); б – с постоянными магнитами ( $2p = 2$ ); в – реактивный ( $2p = 4$ ); з – гистерезисный

К синхронным микродвигателям предъявляются как общие для всех электрических машин требования – высокие энергетические показатели ( $\eta$  и  $\cos\varphi$ ), малые габариты, масса и т. п., так и специфические для синхронных двигателей требования, которые зависят от схемы, в которой применяется двигатель. В одних схемах от двигателя требуется постоянство средней

частоты вращения, в других – постоянство мгновенной частоты вращения в пределах одного оборота ротора и т. п.

Кроме синхронных микродвигателей непрерывного вращения нашли применение импульсные шаговые двигатели.

### ***Основные уравнения синхронных микродвигателей с возбужденными явно выраженными полюсами***

Из общего курса электрических машин известно, что вращающий момент синхронного двигателя с возбужденными явно выраженными полюсами приближенно (без учета активного сопротивления обмотки статора) рассчитывается по формуле

$$M = \frac{mE_0U}{\omega_c x_d} \sin\theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_\varepsilon - M_{dq},$$

где  $m$  – число фаз обмотки статора;

$E_0$  – ЭДС, наводимая магнитным полем ротора в фазе обмотки статора в генераторном режиме ( $n = n_c$ ) при холостом ходе;

$U$  – напряжение питания, приходящееся на фазу обмотки статора;

$\omega_c$  – угловая синхронная скорость;

$x_d = 2nf\omega^2\gamma_d$  – синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по продольной оси машины (оси, совпадающей с осью полюсов);

$x_q = 2nf\omega^2\gamma_q$  – синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по поперечной оси машины (оси, направленной перпендикулярно оси полюсов);

$\gamma_d, \gamma_q$  – магнитные проводимости машины соответственно по продольной и поперечной осям;

$w$  – число витков фазы обмотки статора;

$\theta$  – угол между вектором ЭДС, наводимой потоком по продольной оси и вектором напряжения.

Вращающий момент  $M$  является суммой двух моментов: электромагнитного  $M_\varepsilon$ , возникающего за счет взаимодействия вращающего поля статора с магнитным полем возбужденных полюсов ротора, и реактивного  $M_{dq}$ , обусловленного неравенством магнитных проводимостей машины по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям.

На рис. 107 и 108 схематично показана природа возникновения соответственно электромагнитного и реактивного вращающих моментов синхронного двигателя и их зависимость от угла  $\theta$ . Вращающееся магнитное поле двигателя представлено в виде двух (наружных) полюсов магнита.

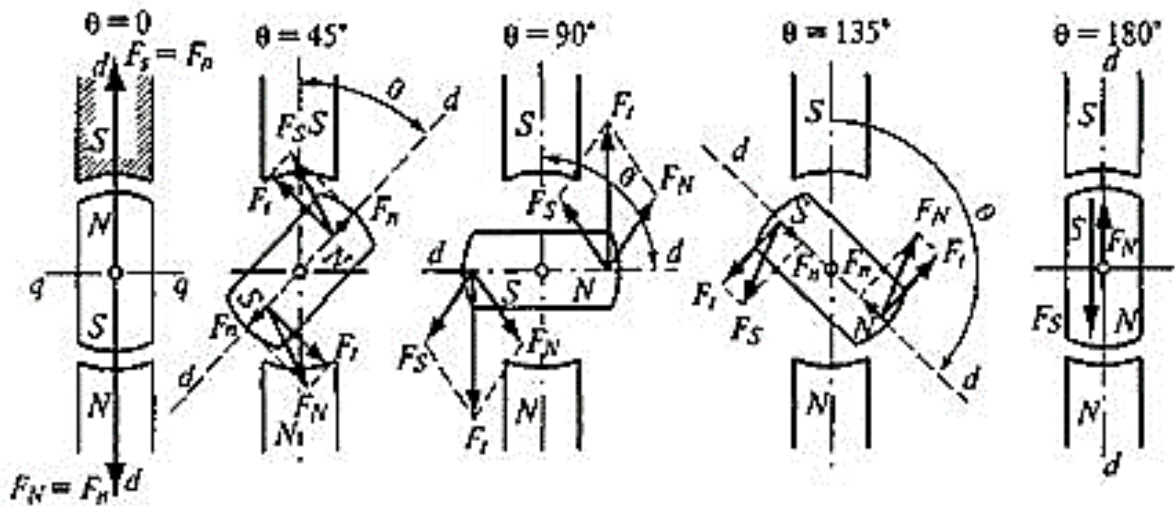


Рис. 107. Электромагнитные силы, действующие на возбужденный ротор без учета реактивного момента:

$F_S, F_N$  – силы, создаваемые северным и южным полюсами магнитов статора,  $F_s, F_n$  – ротора;  $F$  – результирующие тангенциальные силы, создающие вращающий момент ротора

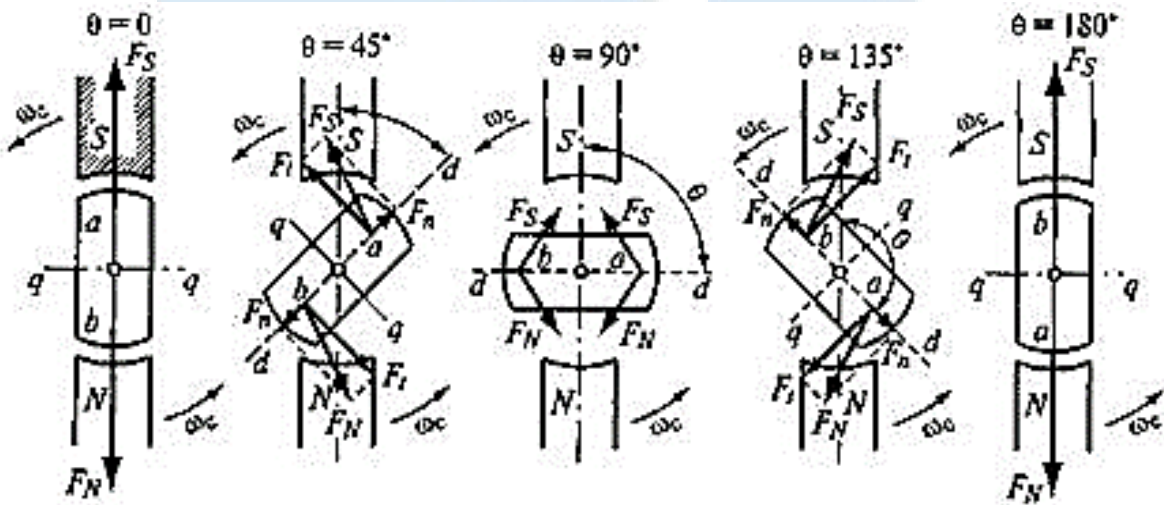


Рис. 108. Электромагнитные силы, действующие на невозбужденный ротор с явно выраженными полюсами

### Асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором

Двигатели с полым немагнитным ротором являются в настоящее время весьма распространенными исполнительными двигателями переменного тока. Они применяются в различных схемах автоматических устройств. Мощность двигателей с полым немагнитным ротором от десятых долей ватта до нескольких сотен ватт. Двигатели рассчитываются как для промышленной

частоты (50 Гц), так и для повышенных частот (200, 400, 500 Гц). Частота вращения двигателей (синхронная) колеблется от 1 500 до 30 000 об/мин.

Конструктивное устройство одного из двигателей с полым немагнитным ротором представлено на рис. 109. Внешний статор (4) такого двигателя ничем не отличается от статора обычного асинхронного двигателя. Он набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали. В пазах статора располагаются обмотки (6) управления и возбуждения, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Эти обмотки либо изолированы друг от друга, либо соединены по мостиковой схеме.

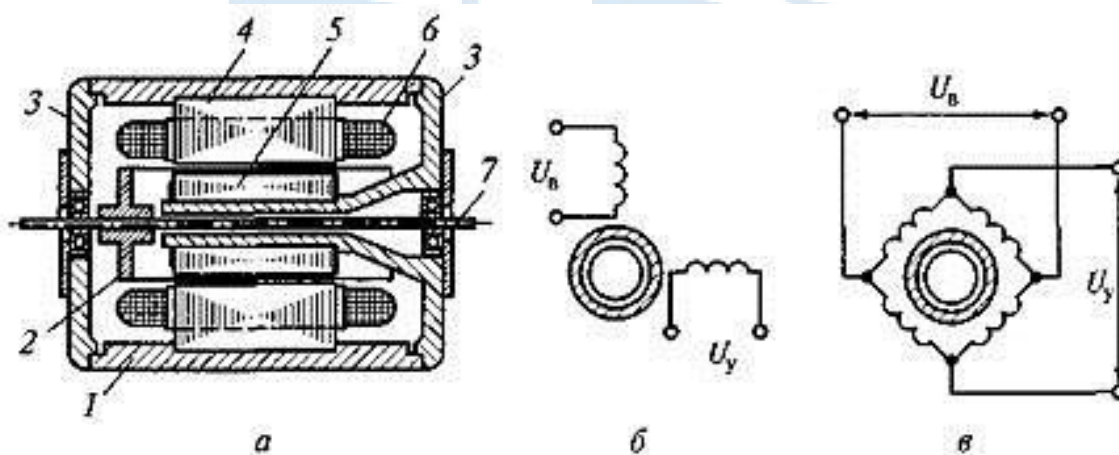


Рис. 109. Конструкция асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором:

- а* – поперечный разрез; *б* – раздельная электрическая схема обмотки статора;  
*в* – мостиковая электрическая схема обмотки статора;  
 1 – корпус; 2 – ротор (немагнитный полый цилиндр); 3 – щит подшипниковый;  
 4 – статор внешний; 5 – статор-сердечник внутренний;  
 6 – обмотка статора; 7 – ось

Мостиковая схема представляет собой замкнутую обмотку с отпайками через  $90^\circ$ . Она помогает достаточно просто осуществить точный пространственный сдвиг обмоток, способствует лучшему распределению токов и потерь в них. К недостаткам схемы следует отнести, во-первых, электрическую связь цепей возбуждения и управления, во-вторых, большое число параллельных ветвей (2а) и отпаек-концов при большом числе пар полюсов ( $2а = 2р$ ) и, в-третьих, постоянство коэффициента трансформации

$$k = w_p/w_y.$$

Внутренний статор (5) набирается из листов электротехнической стали на цилиндрическом выступе одного из подшипниковых щитов. Он служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути основного (рабочего) магнитного потока, проходящего через воздушный зазор. Полый ротор двигателя (2) изготавливается в виде тонкостенного станка из немагнитного



материала, чаще из сплавов алюминия. Своим дном ротор жестко укрепляется на оси (7), которая свободно вращается в подшипниках, расположенных в подшипниковых щитах (3). Толщина стенок ротора зависит от мощности двигателя и колеблется в пределах от 0,1 до 1 мм. Вследствие весьма малой массы ротор обладает незначительным моментом инерции, что является очень ценным свойством двигателя с полым немагнитным ротором, способствующим его широкому распространению. Между стенками ротора и статорами имеются воздушные зазоры, которые обычно составляют 0,15...0,25 мм.

Двигатели мощностью менее 3 Вт изготавливаются несколько иначе. Их обмотки возбуждения и управления размещаются в пазах внутреннего статора, и тогда внешний статор не имеет пазов и служит лишь для уменьшения магнитного сопротивления. При такой конструкции весьма облегчается процесс укладки обмоток в пазы при малых диаметрах расточки статора и несколько повышается вращающий момент, но диаметр ротора для увеличения обмоточного пространства на внутреннем статоре приходится несколько увеличить, что обуславливает некоторое увеличение момента инерции ротора. Для устранения этого недостатка иногда используется третья конструктивная форма двигателя: одна из обмоток размещается на внутреннем, а другая – на наружном статоре.

Характерной особенностью двигателей с полым немагнитным ротором является большой магнитный промежуток  $\delta$  на пути потока между наружным и внутренним статорами, который состоит из двух зазоров:  $\delta_1$  – между внешним статором и ротором и  $\delta_2$  – между внутренним статором. Кроме того, ротор, будучи немагнитным, тоже является воздушным зазором  $\Delta$ . Таким образом, общий размер немагнитного воздушного промежутка между внешним и внутренним статорами  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \Delta$  составляет 0,4...1,5 мм.

Из-за большого немагнитного промежутка двигатели с полым немагнитным ротором имеют большой намагничивающий ток (0,8...0,9)  $I_n$  и низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi$ . Большая сила намагничивающего тока приводит к большим электрическим потерям в обмотках двигателя и значительно снижает его КПД. С целью уменьшения электрических потерь двигателя с полым немагнитным ротором обычно конструируют так, чтобы до 70 % площади поперечного сечения статора у них занимали пазы с обмотками.

В отличие от всех остальных типов роторов, применяемых для асинхронных исполнительных двигателей переменного тока, полый немагнитный ротор при большом активном сопротивлении  $r_p$  обладает весьма незначительным индуктивным сопротивлением  $x_p = (0,05...0,1)r_p$ . Это его свойство способствует значительному повышению линейности механических и регулировочных характеристик двигателей.

Принцип действия двигателя с полым немагнитным ротором состоит в следующем: переменный ток, протекая по обмоткам статора, создает вращающее магнитное поле, которое, пересекая полый ротор, наводит в нем

вихревые токи; в результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем двигателя возникает момент, который, действуя на ротор, увлекает его в сторону этого поля.

К *положительным* свойствам двигателей с полым немагнитным ротором следует отнести:

- малый момент инерции ротора, что в совокупности со значительным пусковым моментом обеспечивает быстрое действие двигателя. Электромеханические постоянные времени  $T_m$  подавляющего большинства современных двигателей не превышают 60 мс;

- сравнительно хорошую линейность механических и регулировочных характеристик. У большинства двигателей нелинейность  $\mu_{0,5}$  лежит в пределах от 0,05 до 0,15, что обеспечивает устойчивую работу двигателя почти при всех частотах вращения и кратность регулирования  $n_{max}/n_{min} = 100...200$ ;

- высокую чувствительность – малый сигнал трогания, что обеспечивается малым моментом инерции ротора, малой его массой, большим пусковым моментом и отсутствием радиальных сил притяжения ротора к статору. Последнее объясняется тем, что ротор немагнитный;

- плавность и бесшумность хода, постоянство пускового момента в любом положении ротора, что определяется отсутствием пазов на роторе, а следовательно, зубцовых гармоник поля.

К *недостаткам* двигателей с полым немагнитным ротором относятся:

- низкий КПД; у большинства двигателей даже в номинальном режиме  $\eta_n = 0,2...0,4$  и значительно уменьшается при регулировании. Низкий КПД объясняется большими электрическими потерями в обмотке статора вследствие большого намагничивающего тока и полым роторе вследствие его большого активного сопротивления;

- низкий коэффициент мощности ( $\cos\phi = 0,2...0,4$ ) вследствие большого немагнитного промежутка между наружным и внутренним статорами;

- большие габариты и масса, обусловленные первыми двумя недостатками. По габаритам и массе двигатель с полым немагнитным ротором больше силовых асинхронных двигателей и исполнительных двигателей постоянного тока той же номинальной мощности в 2-4 раза.

Желание уменьшить габариты и массу приводит к тому, что подавляющее большинство двигателей с полым немагнитным ротором рассчитывается на работу от сетей с повышенной частотой (200... 1 000 Гц). Двигатели с повышенной частотой напряжения питания имеют более высокую частоту вращения  $n = 60f(1 - s)/p$ , а следовательно, развивают те же механические мощности при меньших моментах на валу, значениями которых определяются габариты машин.

В некоторых схемах исполнительные двигатели должны длительное время развивать вращающий момент при неподвижном роторе, т. е. работать на упор (в режиме короткого замыкания). С целью необходимого при таком режиме отвода выделяемой в двигателях теплоты иногда выполняют-

ся двигателя с двумя развязанными в механическом отношении роторами, находящимися в расточке одного и того же статора. Один из них – ротор исполнительного двигателя, а другой – вентиляторного.

Двигатель такой конструкции представлен на рис. 110. Его можно рассматривать как два двигателя, – исполнительный и вентиляторный, – обмотки статоров которых соединены последовательно. В режиме короткого замыкания (при неподвижном роторе) входное сопротивление исполнительного двигателя весьма незначительно, поэтому большая часть приложенного напряжения приходится на вентиляторный двигатель, ротор которого вращается с большой частотой и хорошо охлаждает исполнительный двигатель. При возрастании частоты вращения ротора исполнительного двигателя вследствие увеличения его входного сопротивления происходит перераспределение напряжений: на исполнительном двигателе оно увеличивается, на вентиляторном – уменьшается.

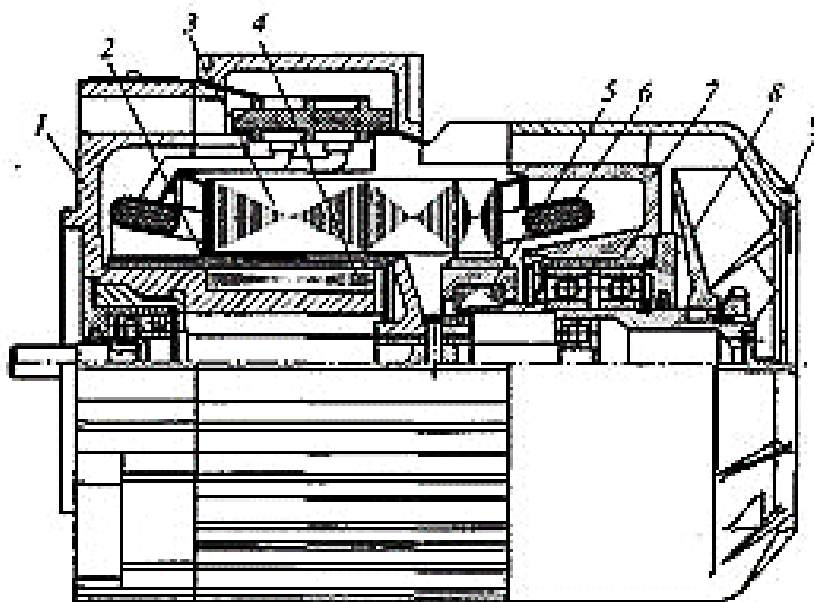


Рис. 110. Асинхронный исполнительный двигатель типа ДАУ-63П  
( $P_n = 63 \text{ Вт}$ ;  $n_n = 2500 \text{ об/мин}$ ) с двумя роторами:

- 1 – передний подшипниковый щит; 2 – полый ротор исполнительного двигателя;  
3 – наружный статор; 4 – внутренний статор исполнительного двигателя;  
5 – короткозамкнутый ротор вентилятора; 6 – обмотки возбуждения  
и управления; 7 – задний подшипниковый щит; 8 – крыльчатка вентилятора;  
9 – кожух вентилятора

### Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

По конструктивному исполнению и свойствам асинхронные исполнительные двигатели с обычным ротором, имеющим короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, можно разделить на две группы:

1) двигатели обычной конструкции, у которых механическая обработка всех деталей производится до сборки двигателя;

2) двигатели «сквозной» конструкции, у которых посадочные места под подшипники и внутренняя поверхность статора обрабатываются в полусобранном состоянии.

Двигатели первой группы имеют обычный для электрических микромашин воздушный зазор 0,15...0,25 мм; а двигатели второй группы – уменьшенный до 0,03...0,07 мм.

Двигатели обычной конструкции применяются чаще всего в обычной промышленной автоматике. Они имеют невысокую стоимость.

Двигатели сквозной конструкции применяются в особо ответственных схемах приборной автоматики. Они имеют лучшие характеристики, но и более высокую стоимость.

Двигатели с ротором обычной конструкции чаще всего применяются в тех схемах автоматики, где быстродействие системы не играет существенной роли. Поэтому в быстродействии ( $T = 0,2...1,5$  с) эти двигатели, имеющие зазор 0,15...0,25 мм, значительно уступают двигателям с полым немагнитным ротором. Однако по некоторым свойствам они выгодно отличаются от последних.

Двигатель с обмоткой в виде беличьей клетки на роторе может быть выполнен со значительно меньшим, чем у двигателя с полым ротором, магнитным сопротивлением на пути рабочего потока, что позволяет снизить намагничивающий ток, электрические потери от него в обмотке статора, а следовательно, повысить  $\cos\phi$  и КПД.

В схемах промышленной автоматики в настоящее время большое распространение получил простой и дешевый асинхронный исполнительный двигатель типа РДМ-09 с короткозамкнутой выполненной в виде беличьей клетки обмоткой на роторе. Статор этого двигателя, набираемый из листов электротехнической стали, имеет восемь зубцов, на каждом из которых располагается по одной катушке. Четыре катушки (через одну) составляют обмотку возбуждения, последовательно с которой включается конденсатор емкостью 1мкФ, четыре другие катушки – обмотку управления. Обе обмотки рассчитаны на напряжение питания 127 В и частоту питающей сети 50 Гц. Номинальная частота вращения двигателя 1 200 об/мин.

В двигатель РДМ-09 встроен редуктор с передаточным отношением, соответствующим одному из восьми возможных вариантов, что позволяет изменять частоту вращения на выходе от 1,92 до 76,8 об/мин.

Двигатели сквозной конструкции (рис. 111) появились сравнительно недавно, но уже получили очень широкое распространение. Особенностью этих двигателей является то, что диаметр расточки под подшипники (в подшипниковых щитах) у них равен внутреннему диаметру статора, что позволяет производить окончательную обработку (шлифовку) внутренней поверхности статора и отверстий под подшипники после сборки (установки

подшипниковых щитов) одновременно. Такая конструкция двигателя позволяет уменьшить воздушный зазор между статором и ротором до 0,03...0,05 мм, что способствует снижению намагничивающегося тока, потерь в обмотке статора, а следовательно, повышает  $\cos\phi$ , КПД и коэффициент использования двигателя.

Ротор для уменьшения момента инерции обычно изготавливается малого диаметра. Необходимая мощность обеспечивается за счет увеличения его длины. Обычно отношение длины ротора к его диаметру равно 2...3.

Увеличение (за счет уменьшения воздушного зазора) вращающего (крутящего) момента  $M_k$ , развиваемого двигателем, и уменьшение (за счет диаметра ротора) момента инерции ротора  $J_p$  позволяют значительно снизить электромеханическую постоянную времени двигателя  $T_m = J_p/M_k$ .

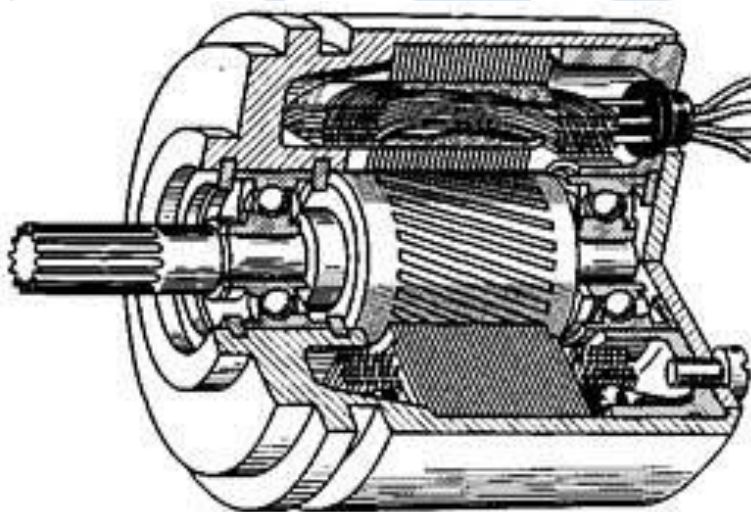


Рис. 111. Асинхронный исполнительный двигатель сквозной конструкции

Преимущество исполнительных двигателей сквозной и обычной конструкции типа беличьей клетки ротора по отношению к двигателям с полым немагнитным ротором особенно ощутимо при очень малых мощностях – от сотых долей ватта до 3... 5 Вт и больших мощностях – свыше 200...300 Вт, когда в процентном отношении потери от намагничивающегося тока у двигателей с полым ротором особенно велики.

К *положительным* свойствам двигателей сквозной конструкции следует отнести:

- более высокие  $\cos\phi$  и КПД;
- меньшие массу и габаритные размеры в определенных диапазонах номинальных мощностей.

*Недостатками* двигателей с обычным короткозамкнутым ротором являются:

- сравнительно большой момент инерции ротора, что ведет к увеличению электромеханической постоянной времени;

- сравнительно большой сигнал трогания, что обусловлено массой ротора, наличием действующих на ротор радиальных сил одностороннего магнитного притяжения к статору из-за ферромагнитных свойств ротора;
- наличие высших зубцовых гармоник поля.

### Асинхронные двигатели с полым ферромагнитным ротором

В системах автоматики иногда в качестве исполнительных, а также силовых применяют двигатели с полым (а иногда и с массивным) ферромагнитным ротором. Статоры таких двигателей ничем не отличаются от статоров обычных двухфазных асинхронных машин, а роторы изготавливаются в виде полых ферромагнитных цилиндров с толщиной стенок от 0,3 до 3 мм (рис. 112). Так как ротор ферромагнитный, то магнитный поток замыкается непосредственно по ротору. Таким образом, в отличие от двигателя с полым немагнитным ротором здесь нет необходимости в наличии внутреннего статора. Воздушный зазор между ротором и статором в этих двигателях небольшой (0,2...0,3 мм), поэтому его намагничивающая сила невелика. В этом отношении двигатель с ферромагнитным ротором выгодно отличается от двигателя с немагнитным ротором. Однако суммарная магнитодвижущая сила, а следовательно, и намагничивающий ток ( $I_{\mu}$ ) двигателя практически не отличается от МДС и  $I_{\mu}$  двигателя с полым немагнитным ротором. Причиной этого является то, что магнитная проводимость полого ферромагнитного ротора вследствие его малой толщины весьма незначительна.

Как результат наличия большого намагничивающего тока, коэффициент мощности двигателя с полым ферромагнитным ротором практически такой же, как у двигателя с полым немагнитным ротором ( $\cos\phi = 0,3...0,5$ ), причем значение его уменьшается при увеличении частоты питающей сети.

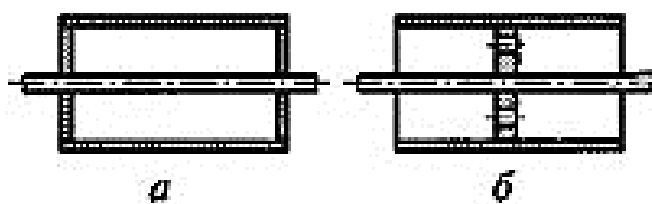


Рис. 112. Полый ферромагнитный ротор с двумя торцевыми пробками (а) и с одной пробкой, имеющей вентиляционные отверстия (б)

Активное сопротивление полого ферромагнитного ротора весьма значительно. Это объясняется, во-первых, тем, что ферромагнитные материалы, из которых изготавливается ротор, обладают значительно большим удельным сопротивлением, чем медь и алюминий, а во-вторых, тем, что при работе машины вследствие эффекта вытеснения ток ротора протекает лишь по

небольшому поверхностному слою, толщина которого зависит от материала и частоты тока.

Вследствие большого активного сопротивления ротора критическое скольжение двигателей с полым ферромагнитным ротором значительно больше единицы, поэтому эти двигатели не имеют самохода и устойчиво работают во всем диапазоне скоростей – от нуля до синхронной. По этой же причине механические и регулировочные характеристики двигателей с полым ферромагнитным ротором весьма близки к линейным, т. е. они более линейны, чем характеристики двигателей с полым немагнитным и обычным короткозамкнутым роторами. Линейность характеристик двигателя увеличивается с увеличением частоты питающей сети.

У некоторых двигателей вследствие большого активного сопротивления ротора уменьшается КПД. С целью уменьшения активного сопротивления производят омеднение ротора, т. е. цилиндрическую поверхность ротора гальваническим путем покрывают слоем меди толщиной 0,05...0,1 мм, что способствует увеличению момента и мощности на валу двигателя. Омеднение торцевых поверхностей ротора более эффективно. Оно способствует увеличению не только момента и мощности на валу двигателя, но и его КПД. Исполнительные двигатели с полым и массивным ферромагнитным роторами иногда используются при высоких температурах окружающей среды, особенно при необходимости обеспечения высоких и сверхвысоких (60 000...100 000 об/мин) частот вращения.

### **Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами**

В схемах автоматики применяется большое количество различных типов синхронных микродвигателей с постоянными магнитами, отличающихся друг от друга по способу запуска, конструктивному исполнению, способу питания и т. п. Все синхронные двигатели с постоянными магнитами, если их классифицировать по одному из основных показателей – способу запуска, можно разделить на три группы:

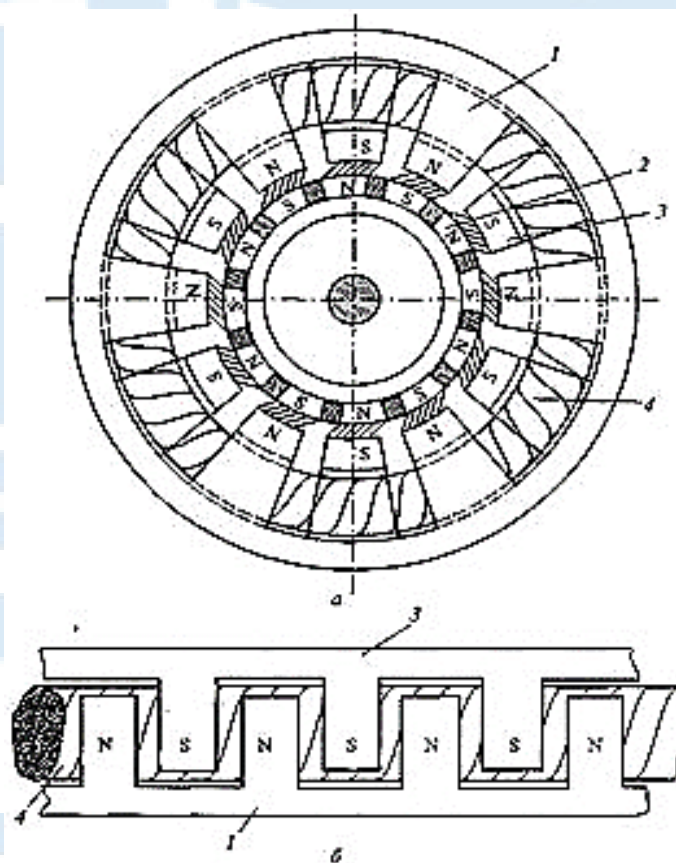
- самозапускающиеся микродвигатели;
- двигатели с асинхронным пуском;
- двигатели с гистерезисным пуском.

*Самозапускающиеся* синхронные микродвигатели с постоянными магнитами находят в настоящее время очень широкое применение в схемах автоматики. Они используются для привода часовых механизмов, механизмов реле, всевозможного рода программных устройств и т. п. Номинальные мощности таких двигателей обычно не превышают долей ватта. Они имеют большое число полюсов и небольшие синхронные частоты вращения (обычно  $n_c = 60f/p \leq 375$  об/мин).

Двигатели часто рассчитываются на работу от однофазных сетей переменного тока. Их магнитное поле либо пульсирующее, либо резко выра-

женное эллиптическое (у двигателей с расщепленными экранированными полюсами). Пуск этих двигателей часто осуществляется в течение полупериода изменения тока за счет всегда существующего в синхронных двигателях пульсирующего момента. Самозапускающиеся двигатели рассчитываются либо на малоинерционную нагрузку, либо за счет специального устройства, развязывающего ротор и вал на время пуска, пускаются вхолостую, а затем нагружаются. Для обеспечения пуска таких двигателей широко используют различные устройства с пружинами, храповиками и иными приспособлениями, обеспечивающими вращение ротора в заданном направлении и блокирующими обратный ход.

Самозапускающиеся синхронные микродвигатели с постоянными магнитами обычно выпускаются плоскими, т. е. имеют относительно большой диаметр и малую длину. Их обмотка возбуждения имеет вид кольца, а магнитная цепь статора, изготовленная зачастую из одного листа стали, имеет клювообразные полюсы, расщепленные у двигателей с экранированными полюсами. КПД таких двигателей невелик – 3 ... 5 %. На рис. 113 представлена схематично конструкция одного из таких микродвигателей.

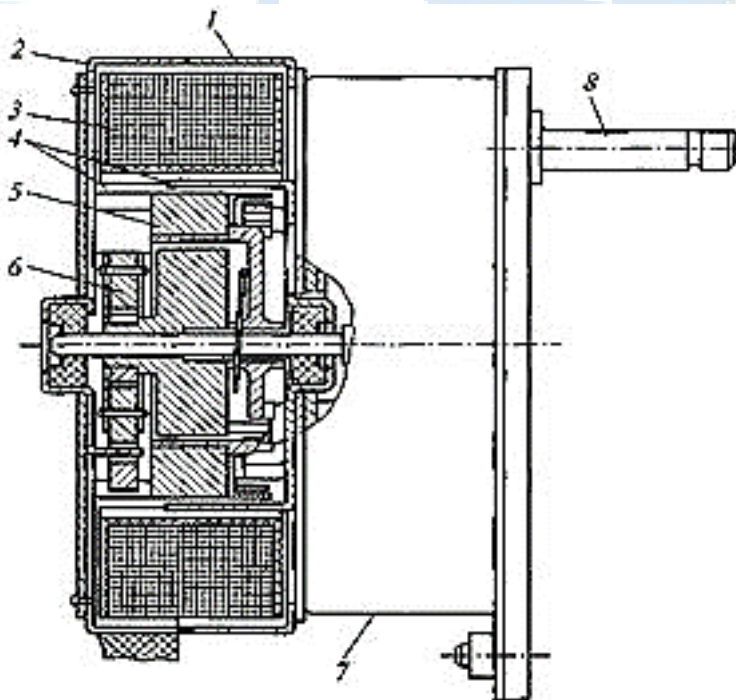


*Рис. 113. Конструктивная схема самозапускающегося однофазного синхронного микродвигателя с постоянными магнитами:*

*а – общий вид; б – развертка статора; 1 – передняя часть магнитопровода статора; 2 – ротор; 3 – задняя часть магнитопровода статора; 4 – обмотка тороидальная*



Основной массовой серией однофазных самозапускающихся синхронных двигателей с постоянными магнитами, выпускаемых в РБ, длительное время являлась серия ДСМ. Двигатели этой серии (рис. 114) рассчитаны на работу от сети с  $f = 50$  Гц напряжением 200, 127, 36, 24, 12 В. Они выпускались как без редуктора, так и с различными понижающими механическими редукторами. Частота вращения выходного вала такого двигателя – 375 об/мин; частота вращения выходного редуктора – 60; 2; 0,2; 1/300 об/мин. Эти двигатели выпускались с правым и левым вращением вала. Мощность, потребляемая ими от сетей, не превосходила 4 Вт. Двигатели серии ДСМ выпускались в больших количествах и в настоящее время еще работают во всевозможных устройствах. Но с началом выпуска и расширением производства новых серий двигателей с лучшими показателями – ДСО, ДСОР, ДСК, ДСКР – выпуск двигателей серии ДСМ сокращается.



*Рис. 114. Самозапускающийся синхронный двигатель серии ДСМ: 1, 2 – передняя и задняя части магнитопровода статора; 3 – обмотка возбуждения; 4 – клювообразные полюса; 5 – ротор; 6 – муфта с пружиной, обеспечивающая одностороннее вращение ротора; 7 – редуктор; 8 – выходной вал*

### **Тихоходные однофазные микродвигатели типов ДСО**

Двигатели синхронные однофазные (ДСО) – это многополюсный двигатель, рассчитанный для работы от однофазных сетей переменного тока с частотой 50 или 60 Гц, с надежными однонаправленным пуском и вращением, предназначенный для работы в различных промышленных и бытовых приборах.

Конструкция двигателя типа ДСО-32 (рис. 115) весьма проста и технологична. Статор состоит из намотанной в виде кольца катушки (7), залитой и соответствующим образом отформованной литевой пластмассой. Отформованная катушка (7) является основой двигателя. Справа и слева к катушке прилегают магнитопроводы (4), имеющие по восемь клювообразных полюсов (6) определенной длины, направленных аксиально и полученных путем неполной выштамповки и отгибки пластин (10) правого и левого магнитопроводов. При этом полюсы одного магнитопровода располагаются между полюсами другого магнитопровода. Магнитопроводы одновременно служат подшипниковыми щитами. В их центральных отверстиях располагаются подшипники скольжения (2), изготовленные путем заливки из литьевого сополимера. Медные пластины (3) особой конфигурации, прилегающие изнутри к правому и левому магнитопроводам (по две штуки к каждому), экранируют определенную часть полюсов статора, выполняя роль короткозамкнутых витков, что обеспечивает при питании катушки статора переменным током через зажимы (9) создание вращающегося в пространстве магнитного поля (не кругового, а эллиптического).

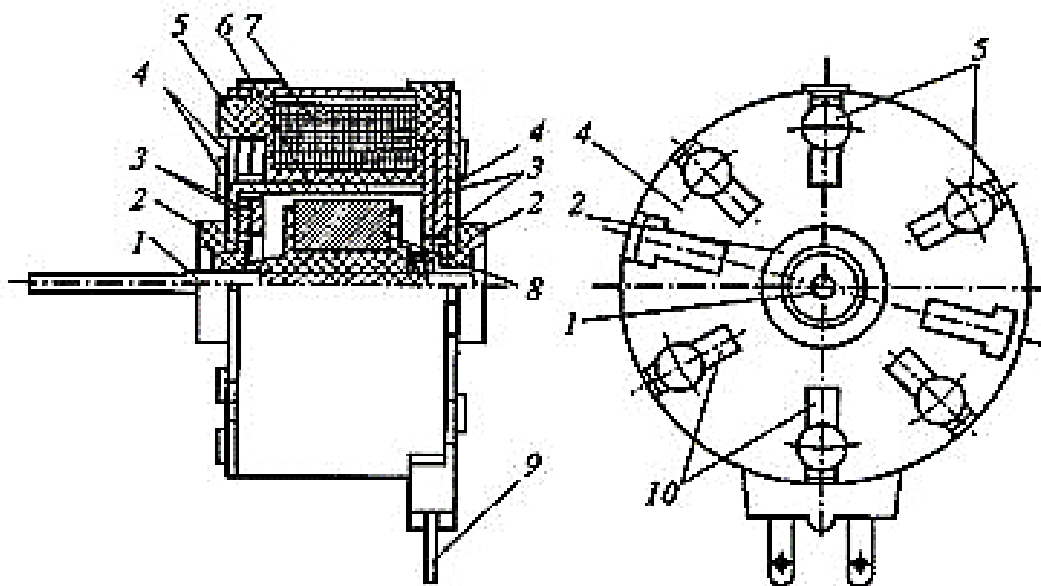


Рис. 115. Однофазный многополюсный двигатель типа ДСО-32 с экранированными полюсами:

- 1 – вал; 2 – подшипники скольжения; 3 – медные пластины;  
 4 – магнитопроводы; 5 – шпильки; 6 – полюс; 7 – катушка;  
 8 – постоянный магнит; 9 – зажимы; 10 – пластины

Магнитный поток, созданный обмоткой статора, замыкаясь вокруг нее, проходит по левому магнитопроводу, его клювообразным полюсам, цилиндрическому магниту (8) ротора, клювообразным полюсам правого магнитопровода, правому магнитопроводу и замыкается на внешнем магнитопроводе, соприкасающемся с левым и правым магнитопроводами.

Цилиндрический ротор двигателя состоит из кольцевого феррито-бариевого магнита (8) марки М1БИ, спрессованного литьевым сополимером на стальном валу (1). Цилиндрический магнит ротора имеет 16 полюсов, полученных путем радиального намагничивания.

Двигатель имеет закрытое исполнение с одним выходным концом вала. Подшипниковые щиты, которыми являются торцевые магнитопроводы, и внешний магнитопровод закрепляются на основной части двигателя – катушке, залитой пластмассой, с помощью цилиндрических пластмассовых выступов (шпилек) (5), концы которых после сборки двигателя оплавливаются. Конструкция двигателя весьма технологична, что очень важно при массовом производстве.

Двигатели ДСО-32 выпускаются на номинальные напряжения 12, 24, 40, ПО (127), 220 В. Для работы при напряжениях свыше 220 В рекомендуется включать последовательно с двигателем гасящие напряжение элементы (резисторы или конденсаторы). Режим работы двигателей серии ДСО продолжительный или повторно-кратковременный с частыми пусками, когда продолжительность включения составляет до 60 % от общего времени работы, а частота включения – до 3 600 включений в час. Направления вращения – левое или правое в зависимости от исполнения. Двигатели ДСО-32 выпускаются и для работы от сети с частотой 60 Гц. В этом случае они имеют маркировку ДСО-32-0,08-0,450.

Маркировка ДСО-32Р означает, что к двигателю типа ДСО-32 присоединен понижающий механический редуктор, имеющий определенное передаточное число.

**Конденсаторные тихоходные двигатели** типов ДСК и ДСКР разработаны взамен устаревших двигателей типов ДСД, ДСДР. Рассмотрим устройство и принцип работы базового конденсаторного двигателя ДСК-32-0,25-0,375, схема которого приведена на рис. 116. Цифры в маркировке двигателя означают:

32 – наружный диаметр, мм;

0,25 – пусковой и номинальный моменты, Н-см;

0,375 – частота вращения, тыс. об/мин.

Статор имеет два одинаковых модуля I и II, представляющих собой две независимые одинаковые по конструкции фазные системы, каждая из которых состоит из внешнего (6) и внутреннего (9) одинаковых по конструкции штампованных магнитопроводов, имеющих чашеобразную форму, и сосредоточенной обмотки, выполненной в виде кольцевой каркасной катушки (8), размещенной между внешним и внутренним магнитопроводами. Кольцевой каркас катушки выполнен из литьевого сополимера типа дифлон. Внешние (6) и внутренние (9) магнитопроводы каждого модуля выполнены штамповкой из стали марки П-ВГ-08КП. Магнитопровод изолирован от катушки изоляцией (7). Аксиальному перемещению ротора препятствует пружина (3).

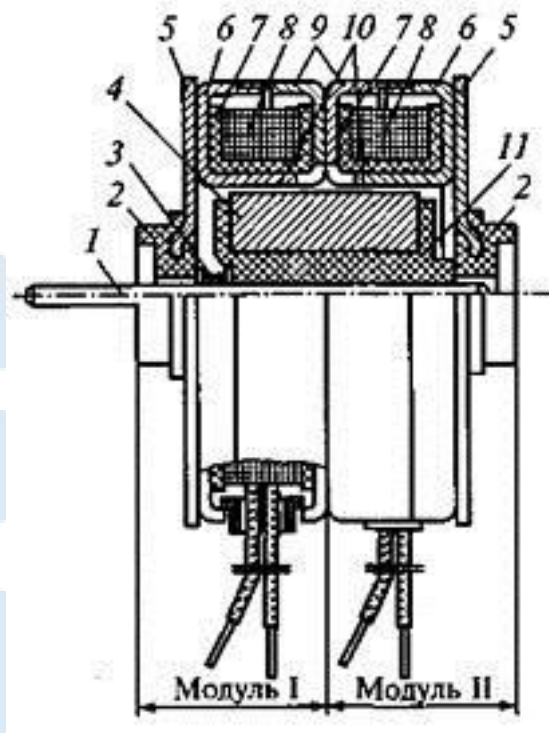


Рис. 116. Конденсаторный многополюсный двигатель ДСК-32-0,25-0,375:  
 1 – вал; 2 – подшипник скольжения; 3 – пружина; 4 – постоянный магнит;  
 5 – щиты подшипниковые; 6 – магнитопровод внешний; 7 – изоляция;  
 8 – катушки; 9 – магнитопроводы внутренние; 10 – полюсы;  
 11 – опрессовка полиамидная

Полюсная система внешних и внутренних магнитопроводов статора состоит из 16 клювообразных полюсов (10) чередующейся полярности, равномерно расположенных по окружности. Формирование полюсов (10) обеспечивается путем просечек при штамповке листовой заготовки и последующей отгибки полюсов под углом  $90^\circ$  к торцевым частям внешних и внутренних магнитопроводов.

Передний и задний подшипниковые щиты (5) двигателя имеют форму дисков с отверстиями в центральной части, в которых из литьевого сополимера типа СФД или полиамида формируются подшипники скольжения (2). Подшипниковые щиты и внешние магнитопроводы механически скрепляются между собой точечной сваркой. Также точечной сваркой скрепляются между собой внутренние магнитопроводы модулей, предварительно сдвинутые между собой на  $90^\circ$  (электрических).

Ротор двигателя состоит из кольцевого ферритобариевого постоянного магнита (4) марки ФБИ-1а, который спрессован полиамидом (11) на валу (1). Магнит (4) ротора намагничен в радиальном направлении и имеет 16 неявно выраженных полюсов чередующейся полярности.

Частота вращения ротора базового двигателя – 375 или 450 об/мин при частотах питающего напряжения соответственно 50 или 60 Гц. Базовый

электродвигатель имеет различные исполнения на напряжения 12, 24, 110, 127, 220 В, которые отличаются друг от друга лишь числом витков обмотки статора.

Наряду с возможностью работы от двухфазной симметричной сети (со сдвигом напряжений фаз во времени на четверть периода –  $90^\circ$ ) базовый двигатель ДСК-32-0,25-0,375 предназначен для работы от однофазной сети с постоянно включенным последовательно с одной из его фаз (обмоток) конденсатором. При этом для номинальных напряжений сети 12, 24 и 40 В используется схема с параллельным включением обмоток, а для напряжений 110 В и выше – с последовательным. Реверс двигателя достигается посредством переключения конденсатора из цепи одной обмотки в цепь другой.

На базе двигателя ДСК-32-0,25-0,375 разработана серия однофазных реверсивных конденсаторных тихоходных синхронных двигателей с механическими редукторами типа ДСКР-32, которые работоспособны в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок. Серии двигателей ДСК-32 и ДСКР-32 имеют 180 исполнений, в том числе различные климатические.

Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском отличаются от других типов синхронных двигателей с постоянными магнитами наличием на роторе короткозамкнутой обмотки типа беличьей клетки, предназначенной, во-первых, для пуска двигателя, во-вторых, для стабилизации его частоты вращения – демпфирования качаний ротора при резких изменениях нагрузки.

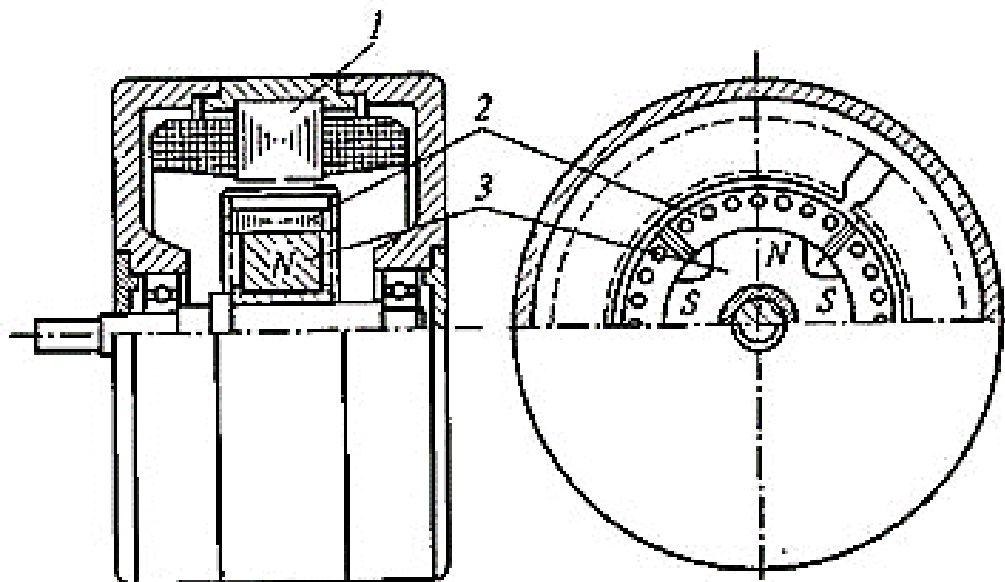


Рис. 117. Синхронный двигатель с радиальным расположением постоянного магнита и пусковой короткозамкнутой обмотки:

1 – статор; 2 – шихтованная часть ротора с короткозамкнутой обмоткой;  
3 – постоянный магнит

В последнее время наибольшее распространение получили синхронные двигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным (рис. 117) и аксиальным расположениями постоянного магнита и пусковой короткозамкнутой обмотки.

Статоры двигателей обоих конструктивных исполнений ничем не отличаются от статоров обычных синхронных и асинхронных машин. В пазах шихтованных статоров располагаются трехфазные или двухфазные обмотки переменного тока. Роторы двигателей сочетают в себе элементы синхронного двигателя – постоянные магниты и асинхронного двигателя – короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, располагающуюся в пазах.

Двигатели с радиальным расположением постоянного магнита и пусковой обмотки имеют кольцевой пакет стали ротора, напрессованный на постоянный магнит-звездочку, в пазах которого располагается короткозамкнутая обмотка. В стальном магнитопроводе ротора имеются междуполюсные прорезы, размеры которых выбираются из условия хорошего асинхронного пуска и оптимального использования энергии постоянного магнита в синхронном режиме, т. е. из условия уменьшения потока рассеяния магнита. Пакет стали ротора с короткозамкнутой обмоткой предохраняет магнит от размагничивания в режиме пуска (короткого замыкания).

С целью предохранения магнита от размагничивания, а также увеличения асинхронного момента, необходимого для пуска, междуполюсную прорезь желательно выбирать минимально возможной. Исследования показывают, что оптимальный размер прорези увеличивается с увеличением мощности двигателя. Иногда с целью улучшения пусковых свойств двигателя и увеличения механической прочности его ротора между полюсными наконечниками оставляют небольшие перемычки – мостики насыщения (рис. 118).

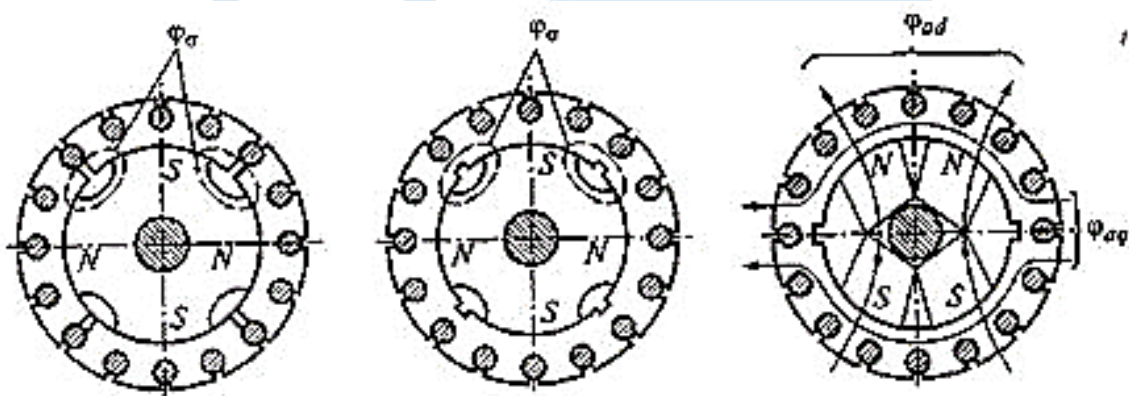


Рис. 118. Различные конструкции роторов синхронных микродвигателей с радиальным расположением постоянных магнитов и пусковой короткозамкнутой обмотки

Синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском в ряде случаев имеют существенные преимущества по сравнению с синхронными реактивными и гистерезисными двигателями:

- более высокие энергетические показатели – КПД и  $\cos \varphi$  (рис. 119);
- большую удельную мощность  $P_s$  – мощность на единицу массы (особенно при мощностях в десятки и сотни ватт и большом числе пар полюсов);
- повышенную перегрузочную способность, стабильность частоты вращения;
- хорошую синфазность вращения, что часто требуется в групповых приводах.

В некоторых системах автоматики применяются синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и гистерезисным пуском.

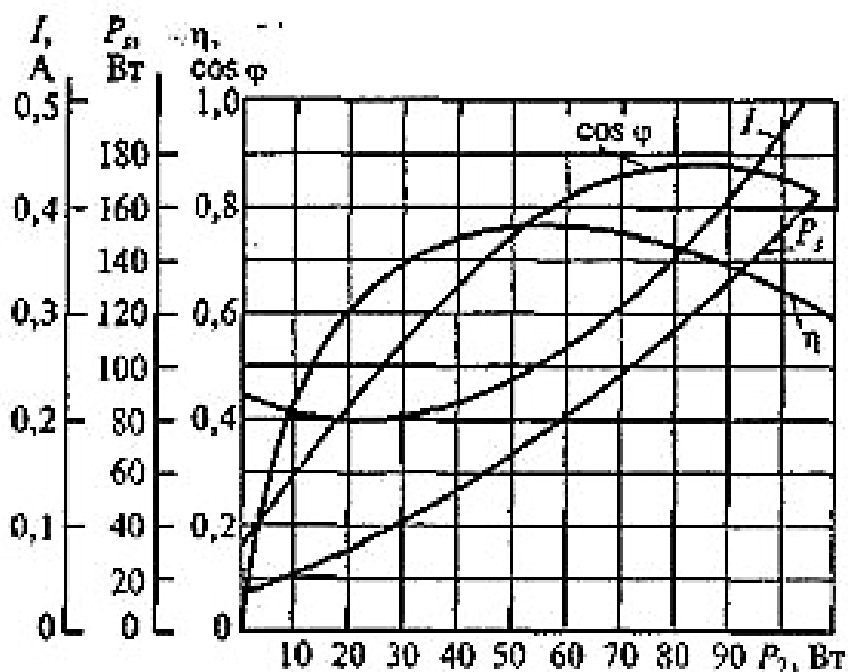


Рис. 119. Рабочие характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами ( $P_s$  – мощность на валу двигателя)

### Синхронные реактивные микродвигатели

Благодаря простоте конструкции, невысокой стоимости, необходимости лишь одного источника питания, высокой надежности, стабильности характеристик синхронные реактивные микродвигатели, несмотря на сравнительно невысокие энергетические показатели, находят широкое применение во всевозможных схемах автоматики, физических приборах, приборах магнитной записи, связи и др. В настоящее время известно много различных

вариантов конструктивного выполнения синхронных реактивных микродвигателей. Конструкция определяется назначением, частотой вращения, системой питания и целым рядом других факторов.

Наибольшее распространение в настоящее время нашли синхронные микродвигатели, которые конструктивно мало отличаются от трехфазных и однофазных асинхронных микродвигателей. Их статоры аналогичны статорам асинхронных двигателей. Роторы же синхронных реактивных микродвигателей весьма разнообразны (рис. 120). До последнего времени наибольшее распространение имел ротор, представленный на рис. 120, *а*, отличающийся от обычного короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя лишь наличием впадин – вырезов из цилиндрической поверхности, с помощью которых образуются явно выраженные полюсы, необходимые для работы двигателя в синхронном режиме.

Принцип действия синхронного реактивного двигателя весьма прост. Ротор разгоняется до подсинхронной скорости за счет асинхронного момента, а затем втягивается в синхронизм за счет синхронизирующего момента, возникающего вследствие разности магнитной проводимости по продольной и поперечной осям.

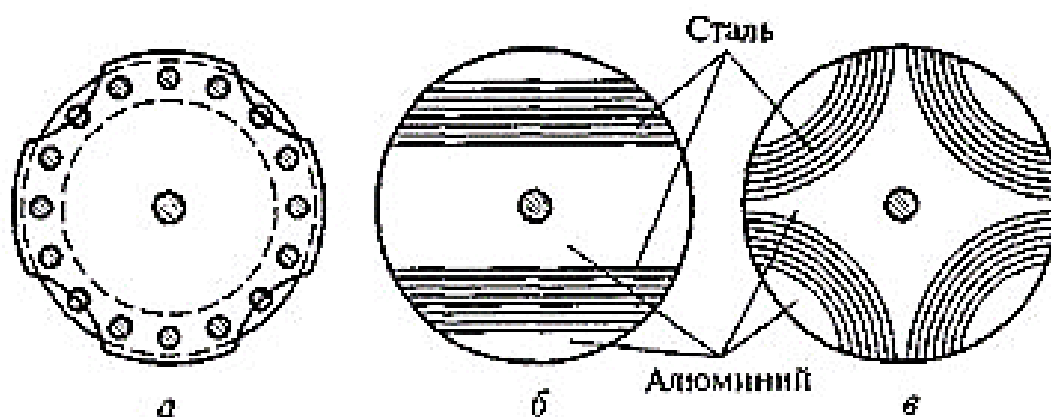


Рис. 120. Некоторые виды (*а ... в*) роторов синхронных реактивных двигателей

Значение вращающего момента  $M_{a\Sigma}$  при пуске (в асинхронном режиме) определяется основным асинхронным моментом  $M_{a1}$  и моментом от обратновращающегося поля ротора  $M_{a2}$  (рис. 121), возникающего вследствие несимметрии сопротивления его короткозамкнутой обмотки.

Пусковые свойства двигателя характеризуются его пусковым током, начальным пусковым моментом  $M_n$  и моментом входа  $M_{вх}$ . При выборе активного сопротивления обмотки типа беличьей клетки руководствуются теми же соображениями, что и при выборе сопротивления обмотки ротора двигателей с постоянными магнитами.



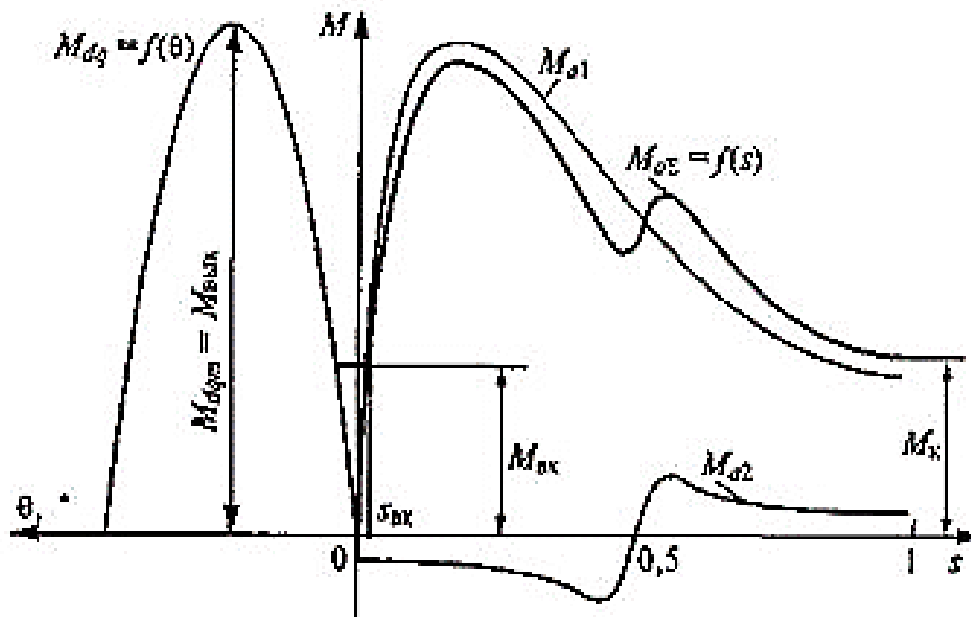


Рис. 121. Графики зависимости вращающих моментов синхронного реактивного двигателя в синхронном  $M_{dq} = f(\theta)$  и асинхронном  $M_{a\Sigma} = f(s)$  режимах

Особенностью реактивного двигателя является то, что его момент как в синхронном, так и асинхронном режимах прямо пропорционален квадрату приложенного напряжения. Это свойство обуславливает высокую чувствительность двигателя к колебаниям напряжения сети. Так, при уменьшении напряжения на 15 % ( $U = 0,85 U_n$ ) вращающий момент уменьшается на 28 %.

Так как вращающий момент реактивного двигателя в синхронном режиме прямо пропорционален разности магнитных проводимостей ротора по продольной  $\lambda_d$  и поперечной  $\lambda_q$  осям или разности индуктивных сопротивлений ( $x_d - x_q$ ), то, казалось бы, что для увеличения момента необходимо как можно больше увеличивать эту разность, т. е. делать впадины на роторе как можно шире и глубже. На самом деле это не так. Дело в том, что увеличение впадин у широко распространенных роторов, способствуя увеличению максимального синхронизирующего момента, в то же время приводит к уменьшению момента в асинхронном режиме, как начального пускового (при  $p = 0$ ), так и подсинхронного (при  $p \approx p_c$ ), значение которого во многом определяет момент входа двигателя в синхронизм.

Уменьшение момента в асинхронном режиме при увеличении впадин объясняется увеличением среднего воздушного зазора, что вызывает увеличение намагничивающего тока, падение тока на значительном в микродвигателях сопротивлении обмотки статора и, следовательно, уменьшение основного магнитного потока двигателя. Значение подсинхронного момента при увеличении впадин уменьшается, кроме того, за счет наблюдающегося при этом увеличения асимметрии сопротивлений стержней обмотки ротора. Увеличение впадин в синхронном режиме приводит к уменьшению  $\cos\phi$  при моментах нагрузки, близких к максимальным (при  $\theta = 35...40^\circ$ ), вслед-

ствие того, что основному магнитному потоку статора приходится проходить по пути с большим магнитным сопротивлением.

В реальных двигателях, а обычно отношение полюсной дуги к полюсному делению выбирается равным 0,5...0,6, а отношение  $\delta_{\max}/\delta_{\min}$  – равным 10...12. Однако даже двигатели с оптимальной шириной и глубиной впадины имеют сравнительно низкие пусковые и энергетические показатели и развивают в два-три раза меньшую мощность, чем одинаковые с ними по габаритам асинхронные двигатели ( $M_k/M_n = 1...1,5$ ;  $M_{вх}/M_n = 1...1,5$ ;  $M_m/M_n = 1,2...2,2$ ;  $\eta = 0,05...0,5$ ;  $\cos\varphi = 0,2...0,5$ ), причем свойства двигателей ухудшаются с уменьшением их номинальной мощности.

Появившиеся в последние годы синхронные реактивные двигатели с роторами новой конструкции позволили значительно улучшить пусковые и рабочие свойства двигателей. Особенностью усовершенствованных роторов является то, что у них разность магнитных проводимостей, а, следовательно, и синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям создается не за счет наружных междуполюсных впадин, а в основном за счет внутренних вырезов в пакете стали ротора, которые позволяют получить значительную разность ( $x_d - x_q$ ) при сравнительно небольшой величине среднего воздушного зазора и сравнительно небольшой асимметрии сопротивлений пусковой обмотки ротора. Пакеты стали таких роторов обычно заливаются сплавом алюминия, который, скрепляя их, одновременно выполняет функции проводника токов ротора, проходящих здесь не только по стержням наружных пазов.

Применение роторов усовершенствованных конструкций позволило значительно улучшить свойства синхронных реактивных двигателей. Так, например, замена обычного ротора, изображенного на рис. 121, новым усовершенствованным ротором в двигателе, изготовленном на базе асинхронного двигателя АОЛ 021/4, позволила увеличить момент выхода из синхронизма на 50 %, момент входа в синхронизм на 80 %; начальный пусковой момент на 40 %; максимальный  $\cos\varphi$  на 40 %; максимальный КПД на 30 %.

### **Синхронные гистерезисные двигатели**

В настоящее время в схемах автоматики получили весьма широкое распространение синхронные гистерезисные микродвигатели. Статор обычного гистерезисного двигателя ничем не отличается от статоров синхронных и асинхронных машин. Пакет статора набирается из изолированных листов электротехнической стали. В полузакрытых (с неширокой прорезью) пазах располагается обычная трехфазная или двухфазная (в конденсаторных двигателях) обмотка, которая при подключении к сети переменного тока создает вращающееся магнитное поле. Ротор большинства гистерезисных двигателей представляет собой сплошной или шихтованный полый цилиндр из магнитотвердого материала, имеющего широкую петлю гистерезиса (об-

ладающего большой остаточной намагниченностью), и располагается на магнитной или немагнитной втулке. Магнитные схемы гистерезисных двигателей с различными роторами представлены на рис. 122.

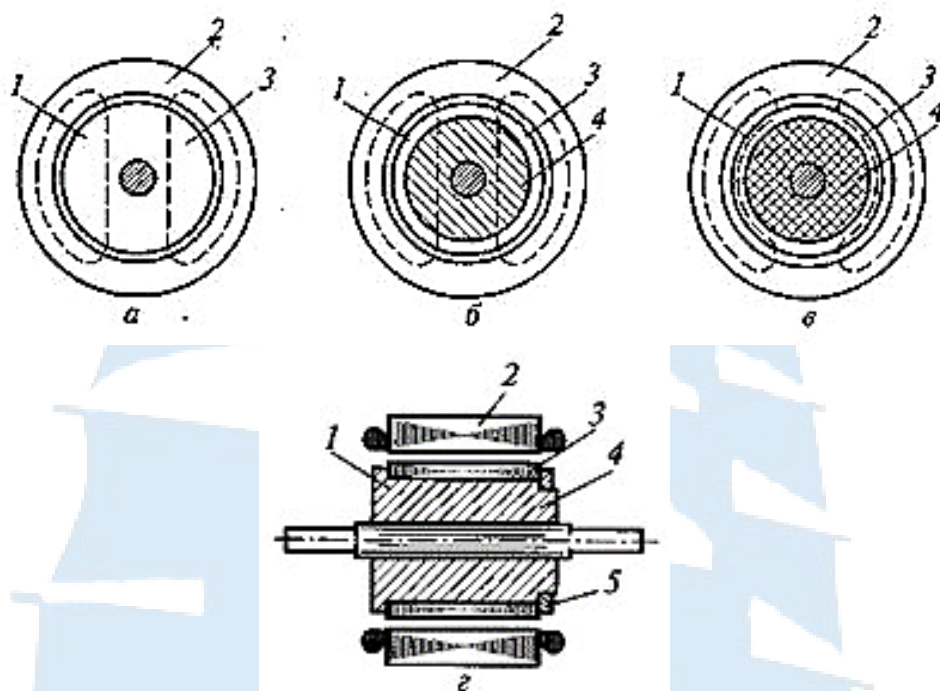


Рис. 122. Магнитные схемы гистерезисных двигателей с различными роторами:

*а* – с ротором из магнитотвердого материала; *б* – с составным ротором с ферромагнитной втулкой; *в* – с составным ротором с немагнитной втулкой;

*г* – двигателя с ферромагнитной втулкой

(1 – ротор; 2 – статор; 3 – магнитотвердый материал; 4 – втулка; 5 – запорное кольцо)

Принцип действия гистерезисного двигателя рассмотрим на примере двигателя со сплошным массивным ротором. Вращающий момент такого двигателя можно представить как сумму двух моментов: основного гистерезисного  $M_g$ , обусловленного наличием большой остаточной намагниченности, и момента от вихревых токов  $M_v$ :  $M = M_g + M_v$ .

Момент от вихревых токов возникает в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля двигателя с вихревыми токами ротора. По своей природе это асинхронный момент. Он равен нулю при синхронизме и вследствие большого активного сопротивления массивного ротора максимален при пуске ( $n = 0$ ). Если бы двигатель обладал только моментом от вихревых токов, то его механическая характеристика не отличалась бы ничем от механической характеристики обычного асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением ротора, имеющего  $s_k > 1$ .

Возникновение гистерезисного момента объясняется наличием у материала ротора широкой петли гистерезиса. При асинхронной скорости вращения ротор, находясь в магнитном поле, все время перемагничивается. При этом ось поля ротора, изготовленного из магнитотвердого материала, при наличии момента сопротивления на валу отстает от оси вращающегося магнитного поля на некоторый угол. В результате взаимодействия поля ротора с опережающим его вращающимся магнитным полем статора возникает вращающий гистерезисный момент  $M_r$ .

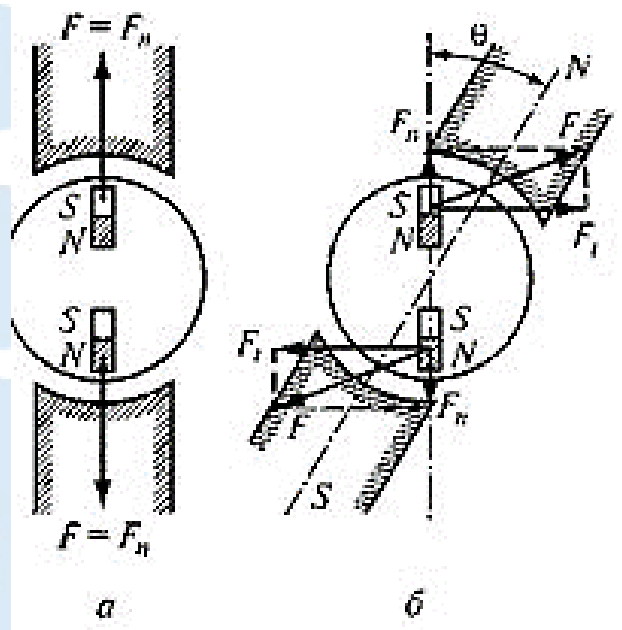


Рис. 123. Принцип действия гистерезисного двигателя:  
 а – схема сил при не вращающемся магнитном поле;  
 б – схема сил при вращающемся магнитном поле

Если ротор гистерезисного двигателя поместить в магнитное поле, то он намагнитится, его области спонтанной намагниченности – элементарные магнитики будут ориентированы по силовым линиям магнитного поля. На рис. 123 схематично показаны два элементарных магнитика. В результате взаимодействия внешнего поля, которое для наглядности представлено в виде двух полюсов магнита, с элементарными магнитиками ротора возникнут силы  $F = F_n$ , которые в положении ротора, соответствующем показанному на рис. 122, а, будут направлены радиально. Момент, действующий на ротор в этом случае, будет равен нулю.

Если полюсы магнита, а следовательно, внешнее магнитное поле вращать относительно ротора, то элементарные магнитики будут поворачиваться вслед за полем полюсов, однако вследствие молекулярного трения, которое у магнитотвердых материалов весьма значительно, они будут отставать от поля полюсов на некоторый угол. Силы взаимодействия  $F$  между

элементарными магнетиками и полем полюсов магнита в этом случае (см. рис. 123, б) кроме радиальных составляющих  $F_n$  будут иметь еще тангенциальные составляющие  $F_t$  которые и создадут вращающий гистерезисный момент.

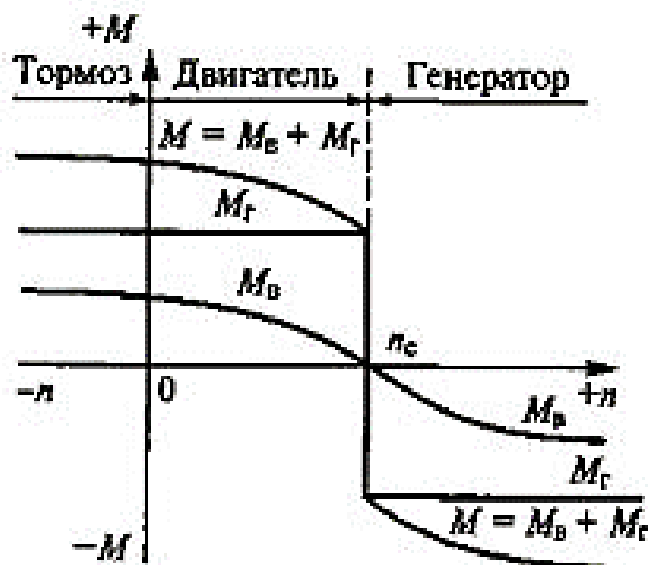


Рис. 124. Механические характеристики гистерезисного двигателя

На рис. 124 представлены механические характеристики гистерезисного двигателя – зависимости гистерезисного момента  $M_G$ , момента от вихревых токов  $M_B$  и суммарного момента  $M = M_G + M_B$  от частоты вращения  $n$  при круговом поле, синусоидально распределенном в пространстве. У гистерезисных двигателей с шихтованным ротором вихревые токи практически отсутствуют, поэтому  $M_B = 0$  и механическая характеристика  $M = M_G = f(n)$  имеет вид прямой линии.

Роторы гистерезисных двигателей по конструктивному исполнению можно разделить на *три группы*.

1. Роторы (сплошные или шихтованные), целиком изготовленные из магнитотвердого материала.

2. Сборные роторы, состоящие из полого цилиндра (сплошного или шихтованного), изготовленного из магнитотвердого материала и ферромагнитной втулки. Такие роторы обычно применяются в случае, если магнитотвердый материал имеет малую магнитную проницаемость  $\mu$  (сравнительно небольшую индукцию насыщения  $B_m$  при большой коэрцитивной силе  $H_c$ ).

3. Сборные роторы, состоящие из активной части – полого (сплошного или шихтованного) цилиндра из магнитотвердого материала – и немагнитной ( $\mu = 1$ ) втулки из алюминия или пластмассы (см. рис. 38, в). Такие роторы применяются в том случае, когда магнитотвердый материал имеет сравнительно большую магнитную проницаемость  $\mu$  (большую  $B_m$  при сравнительно небольшой  $H_c$ ).

Наибольшее распространение в настоящее время получили роторы второй и третьей групп. В некоторых двигателях активная часть ротора изготавливается не из листов, а из проволоки, полос или пресс-порошка.

*Положительные* качества синхронных гистерезисных двигателей следующие:

- большие пусковой момент и момент входа в синхронизм;
- независимость момента входа в синхронизм от момента инерции;
- плавность входа в синхронизм – отсутствие рывка;
- незначительное изменение тока – на 20...30 % от пуска ( $n = 0$ ) до холостого хода ( $n = n_c$ ) и на 1...3 % от холостого хода до номинальной нагрузки;
- сравнительно высокий КПД, достигающий в некоторых двигателях 60 %;
- малое время разгона;
- большая механическая прочность и симметрия ротора, что позволяет создавать высокоскоростные двигатели, в том числе гидродвигатели;
- способность одного и того же ротора работать в магнитных полях различной полюсности – полисинхронизм ротора, позволяющий создавать многоскоростные синхронные двигатели, хотя и неравноценные по качеству на различных скоростях из-за различного намагничивания активного материала ротора;
- высокая температурная стабильность пусковых и рабочих характеристик, обусловленная тем, что изменение температуры влияет лишь на значение активного сопротивления обмотки статора;
- высокая надежность, малый уровень шума и сравнительно небольшие габариты и масса.

*Недостатки* синхронных гистерезисных двигателей, ограничивающие области их применения, сводятся к следующим:

- низкий коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), не превосходящий 0,3...0,45;
- малая стабильность мгновенной скорости вращения – качание ротора при резко изменяющихся нагрузках;
- большой технологический разброс характеристик двигателя, объясняющийся тем, что даже незначительные отклонения от установленного режима термической обработки ведут к значительным изменениям свойств магнитотвердых материалов;
- высокая стоимость магнитотвердых материалов и сложность их механической обработки.

### **Промежуточное тестирование**

1. Исполнительные двигатели постоянного тока: конструкция, типы управления, схемы их включения.
2. Основные типы двигателей переменного тока.
3. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором: конструкция, применение, положительные свойства и недостатки.

## ГЛАВА 12. Шаговые исполнительные двигатели: назначение, разновидности, характеристики и особенности управления

### Шаговый двигатель: особенности и принцип работы

В настоящее время в схемах автоматики наряду с автоматическими системами непрерывного действия, которые осуществляются с помощью исполнительных двигателей обычного исполнения, применяются системы дискретного (импульсного) действия. Такие системы осуществляются с помощью шаговых исполнительных двигателей.

Шаговые двигатели – устройства, которые преобразуют электрические импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые или линейные перемещения ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях.

Шаговые двигатели появились в 30-х годах прошлого столетия.

Первые шаговые двигатели выполнялись в виде электромагнита, приводящего во вращение храповое колесо (рис. 125).

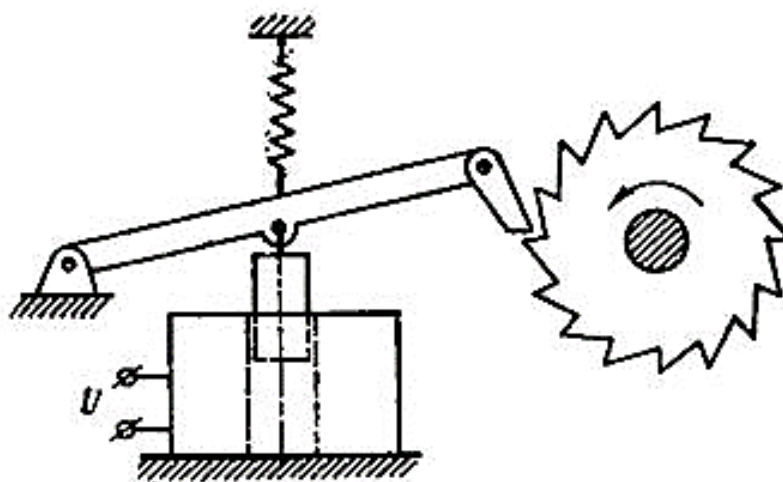


Рис. 125. Шаговый двигатель с электромагнитом и храповиком

За одно включение электромагнита (за один такт) храповое колесо перемещается на вполне определенный угол – шаг, величина которого определяется величиной зубцового шага храпового колеса. Для обеспечения реверса на валу двигателя устанавливалось два храповых колеса, повернутых на  $180^\circ$  относительно друг друга, и двигатель снабжался двумя электромагнитами. Несмотря на наличие целого ряда недостатков, храповые шаговые двигатели и в настоящее время находят еще довольно широкое применение.

Вслед за храповыми двигателями еще в прошлом веке появились шаговые двигатели, по устройству мало отличающиеся от синхронных реактивных двигателей с явно выраженными полюсами на роторе и статоре.

На рис. 126, а (справа) изображена схема одного из таких двигателей, имеющего три пары явно выраженных полюсов на статоре, снабженных согласно включенными обмотками (соответственно 1, 2, 3), и невозбужденный двухполюсный ротор. На том же рисунке (слева) изображен ключ – коллектор (коммутатор), с помощью которого осуществляется управление двигателем. Коммутатор выполнен в форме цилиндра с контактной пластиной КП, охватывающей дугу в  $180^\circ$ . Контактная пластина электрически соединена с контактным кольцом К, по которому скользит щетка Щ; на нее подается питание от сети постоянного тока (+). По внешней поверхности цилиндра коммутатора скользят щетки Щ1, Щ2, Щ3, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  относительно друг друга. Каждая из щеток соединена с одним концом соответствующей обмотки двигателя. Другие концы обмоток соединены между собой, к их общему проводу подводится питание от источника постоянного тока (-).

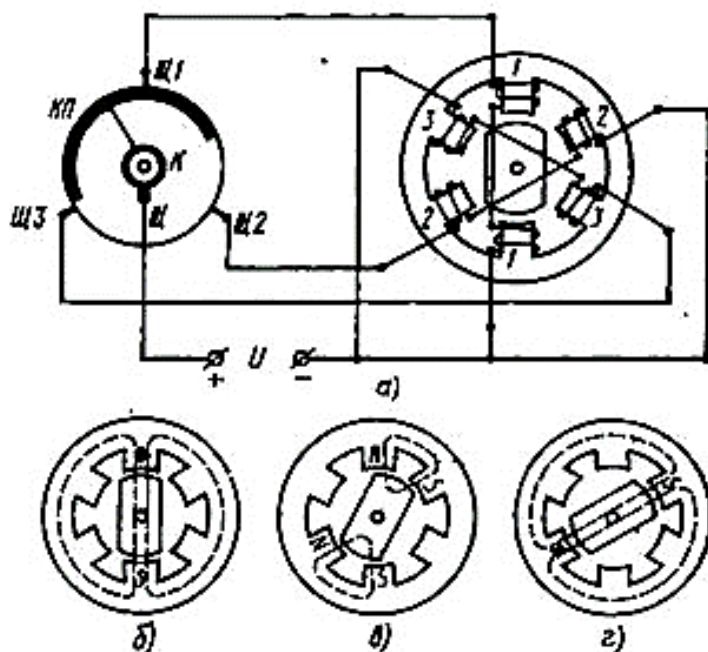


Рис. 126. Шаговый двигатель с контактным коммутатором

В положении, изображенном на рис. 126, а, включена обмотка 1, и ось полюсов ротора (при отсутствии момента сопротивления на валу) совпадает с осью обмотки 1 (рис. 126, б). При повороте цилиндра коммутатора на угол, примерно равный  $60^\circ$ , по часовой стрелке под напряжением оказываются две обмотки (1 и 2), при этом ротор двигателя повернется по часовой стрелке на угол  $30^\circ$  и займет положение, соответствующее рис. 126, в. При повороте цилиндра коммутатора далее на угол, несколько больший  $60^\circ$ , по часовой стрелке цепь обмотки 1 разорвется, обмотка 1 отключится, питаться будет только обмотка 2, и ротор двигателя повернется еще на  $30^\circ$ , заняв положение по оси обмотки 2 (рис. 126, г).



За полный цикл коммутации (поворот ротора коммутатора на  $360^\circ$ ) ротор рассматриваемого двигателя занимает шесть различных положений, которые соответствуют определенной последовательности включения обмоток двигателя. Ротор двигателя при этом повернется на  $180^\circ$ , т. е. шаг двигателя равен  $30^\circ$ .

Частота вращения ротора двигателя зависит от частоты вращения цилиндра коммутатора, т. е. от *частоты коммутации* обмоток. Ротор любого шагового двигателя обладает моментом инерции; на валу ротора обычно имеется момент сопротивления. Для каждого шагового двигателя существует вполне определенная максимальная частота коммутации, при которой ротор двигателя еще следует за дискретно (скачкообразно) перемещающимся полем статора. Эту частоту называют *частотой приемистости*.

Для простоты анализа физических процессов здесь был рассмотрен простейший шаговый двигатель с контактным коммутатором. Аналогичные двигатели были предложены еще в 1892 г. В настоящее время из-за ряда недостатков контактные коммутаторы заменены более надежными электронными коммутаторами на полупроводниковых элементах, которые формируют импульсы вполне определенной формы и частоты, подаваемые на обмотки управления шаговых двигателей.

Чтобы тот или иной электрический прибор работал, ему требуется специальный приводной механизм. Одним из таких механизмов является шаговый двигатель. Шаговый двигатель может быть униполярным или биполярным. Он является электрическим и бесщеточным *двигателем постоянного тока*, способным делить полный оборот на несколько одинаковых шагов. Он состоит из *следующих элементов*:

- специальный контроллер для шагового привода;
- магнитные части;
- обмотки;
- приборная панель (она же выступает в роли блока управления);
- передатчики;
- сигнализаторы.

Шаговый двигатель используется преимущественно для *следующих целей*:

- работы фрезерного станка;
- работы шлифовального станка;
- обеспечивает работу разных бытовых приборов;
- работы производственных механических средств;
- обеспечивает работу транспорта.

### **Принцип работы привода**

Принцип работы данного привода выглядит следующим образом. При приложении напряжения к клеммам, щетки на самом шаговом двигателе начинают постоянно двигаться. Движок холостого хода имеет при этом

уникальное свойство: он преобразовывает входящие импульсы, имеющие преимущественно прямоугольную направленность, в заранее обозначенное положение приложенного ведущего вала.

Каждый из входящих импульсом способен переместить вал под определенным углом. Приборы, которые оснащены подобным редуктором, имеют максимальную эффективность при условии наличия нескольких зубчатых электромагнитов, которые находятся вокруг центрального железного куска, имеющего зубчатую форму. Внешняя цепь управления возбуждает электромагнит. При необходимости повернуть вал двигателя, этот электромагнит, к которому приложена энергия, притягивает к себе зубья колеса. Когда они выравниваются по отношению к электромагниту, они смещены по отношению к последующей магнитной части двигателя.

Первый электромагнит выключается, а затем включается второй, после чего начинает вращаться шестеренка, выравниваясь при этом с предыдущим колесом. Затем такое действие повторяется необходимое количество раз. Каждое из таких вращений называют постоянным шагом, при этом скорость вращения шагового двигателя можно вычислить при подсчете количества шагов, нужных для полного его оборота.

Чтобы контролировать работу шагового двигателя, применяется специальный драйвер. Это необходимо в тех случаях, если вы настраиваете привод для работы станка или применяете его для запуска в работу ветрогенератора.

### **Типы шаговых двигателей**

Шаговые двигатели подразделяются на такие *типы*:

- с наличием постоянного магнита;
- синхронный гибридный привод;
- переменный двигатель.

Все они несколько отличаются друг от друга, в том числе и по принципам своей работы.

Так, например, приводы с постоянными магнитами оснащены специальной магнитной деталью в роторе. Такие двигатели работают по принципу притяжения либо отталкивания статором и ротором мотора на основе электромагнита.

Переменный двигатель имеет обычный железный ротор и работа его построена по принципу фундаментальности. Когда допускается минимальный уровень отталкивания с самым малым зазором, при этом точки ротора имеют притяжение к полюсам статора.

А вот гибридный привод может сочетать в себе оба принципа работы, он считается наиболее дорогой моделью шаговых двигателей.

## Двухфазные шаговые двигатели

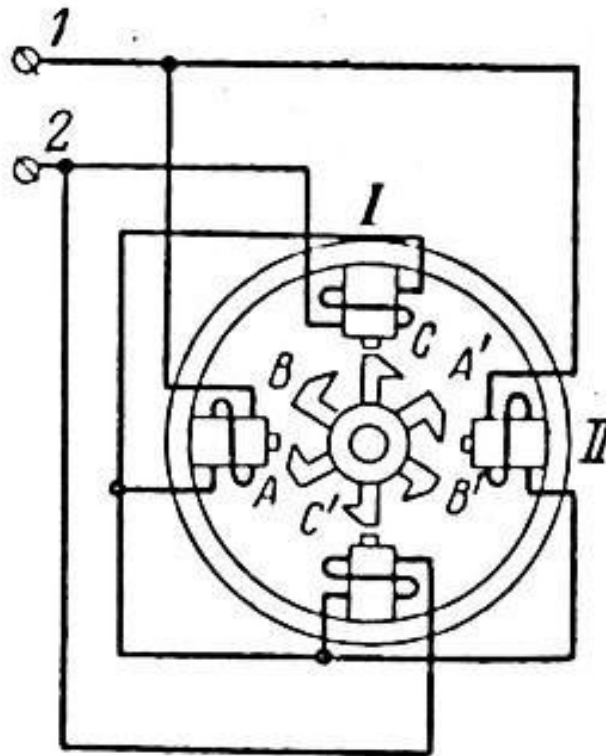


Рис. 127. Схема двухфазного шагового двигателя

Двухфазный мотор очень прост (рис. 127), его можно установить человеку без специального опыта. Независимо от того, собрали ли вы его самостоятельно или приобрели в готовом виде, он имеет два типа обмотки для катушек:

- униполярную;
- биполярную.

Если шаговый двигатель имеет одну обмотку с центральным магнитным краном, влияющим на каждую фазу, то это униполярный привод. Каждую обмоточную секцию следует включить с целью обеспечения нужного направления магнитного поля. В данном приводе магнитный полюс способен функционировать без необходимости дополнительного переключения, поэтому направления тока и цепная коммутация делаются очень просто, при помощи одного транзистора на каждую обмотку. При этом учитываются переключения фазы:

- три провода на фазу;
- шесть на выходной сигнал.

Микроконтроллер двигателя привода можно применять с целью активизации транзистора в той или иной последовательности.

А обмотки можно также подключать при помощи прикосновения проводов соединения вместе с постоянными магнитами привода. При со-

единении катушечных клемм, повернуть вал будет затруднительно. Сопротивление между катушечным торцом и общим проводом равно половине сопротивления катушечных и проводных торцов. Это выглядит так, поскольку общий провод имеет большую длину, нежели половинная часть, используемая для соединения катушек.

Биполярные шаговые двигатели имеют одну фазовую обмотку, в которую ток поступает переломным способом с применением магнитного полюса. Управляющая система в данном случае будет сложной с использованием соединяющего моста. На фазу имеется в наличии два провода, но они не общие. При смещении сигнала шагового двигателя на высоких частотах эффект трения системы может быть снижен.

Кроме того, еще одним типом шагового двигателя является трехфазный, но *сфера его применения* слишком узкая:

- при работе фрезерных станков с ЧПУ (числовым программным управлением);
- на некоторых автомобилях, где применяется дроссельная заслонка;
- на дисководе и принтерах некоторых марок.

### **Реактивные шаговые двигатели: особенности и принцип работы**

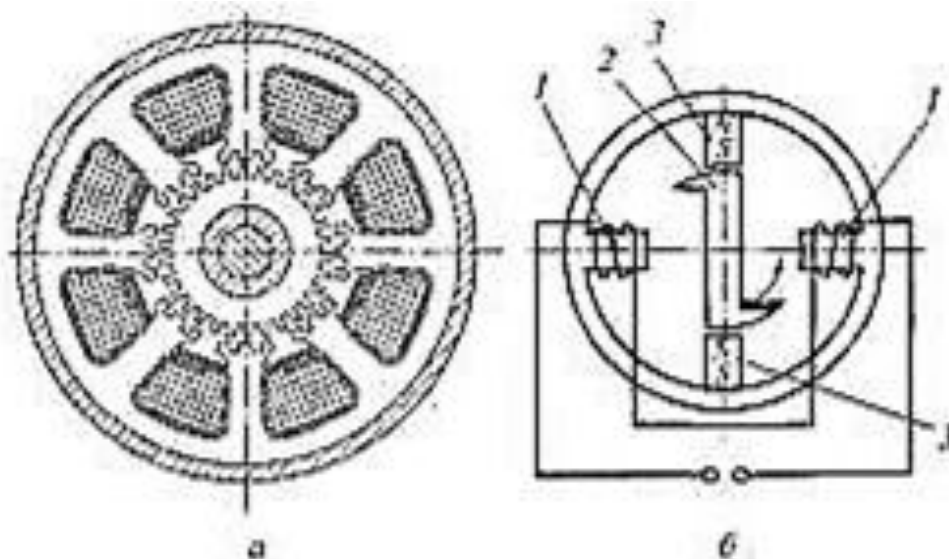
Ранее отмечалось, что активные шаговые приводы имеют большой недостаток: это крупный шаг, достигающий нескольких десятков градусов. В отличие от них, реактивные шаговые двигатели способны редуцировать роторную частоту, благодаря чему шаг становится угловым менее градуса.

Главной особенностью реактивного привода является то, что зубцы размещены на статорных полюсах. Синхронизирующий момент в нем обеспечивается разницей магнитных сопротивлений по поперечной и продольной оси привода (рис. 128). Реактивный шаговый двигатель имеет один ключевой недостаток: в нем отсутствует синхронизирующий момент, если обмотки статора обесточены.

Повысить степень редукиции двигателя, причем независимо какого, активного или реактивного, можно при использовании многопакетных конструкций, когда зубцы статора сдвигаются друг на друга на часть деления, а ротора каждого пакета не сдвигаются и оси их полюсов одинаковые. Подобная конструкция очень сложная в плане создания и стоит в готовом виде недешево, также к ней потребуются сложный коммутатор.

На сегодняшний день в продаже можно отыскать огромное количество всевозможных конструкций двигателей, которые отличаются по таким *параметрам*, как:

- количество фаз;
- тип размещения обмотки;
- способы фиксации ротора и т. д.



*Рис. 128. Схемы шаговых реактивных двигателей:  
а – четырехфазного; б – однофазного двухполюсного  
(1 – обмотки управления; 2 – ротор; 3 – постоянные магниты)*

В индукторных шаговых двигателях момент вращения создается при взаимодействии магнитного поля, которое создается статорными обмотками, и постоянного магнита, располагаемого в зубчатой части зазора.

Синхронизирующий момент в индукторном двигателе сам по себе реактивный, благодаря чему получается статорная обмотка, а постоянный магнит способен создавать момент фиксации, благодаря чему ротор удерживается в нужном положении при отсутствующем токе.

В отличие от реактивного шагового двигателя, индукторный, при аналогичном шаге, имеет больший синхронизирующий момент, а также более улучшенные технические характеристики.

### **Синхронные линейные шаговые двигатели**

С целью автоматизации некоторых производственных процессов на предприятии, иногда возникает необходимость перемещения объектов в плоскости. Чтобы это сделать, потребуется использовать специальный преобразователь вращательного движения в поступательное, что достигается путем применения кинематики.

При помощи линейных шаговых двигателей можно преобразовать импульсную команду прямо в линейное перемещение, что значительно упростит кинематическую схему всевозможных электрических приводов.

Статор в данном приводе представлен в виде магнитомягкой плиты, а провода подмагничиваются путем работы постоянного магнита.

Зубцовые деления в статоре и подвижной части одинаковые, при этом они могут быть сдвинуты на половину деления в пределах одного

провода ротора. Поток подмагничивания и его магнитное сопротивление, в данном случае, не зависят от того, где находится подвижная часть двигателя (рис. 129). Чтобы переместить объект в плоскости согласно двум координатам, применяют двигатели двухкоординатного типа.

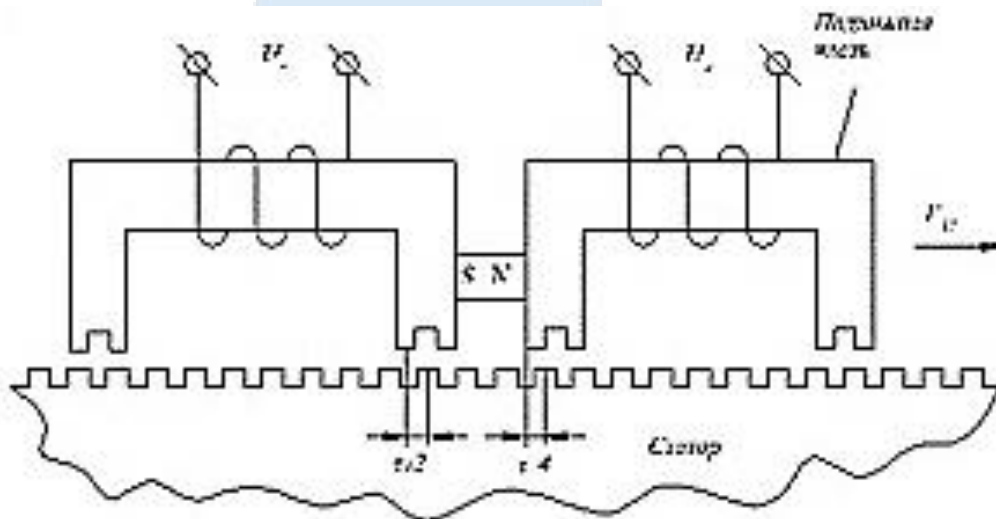


Рис. 129. Схема синхронного линейного шагового двигателя

Также в линейных двигателях используется магнитно-воздушная подвеска. Благодаря силе магнитного притяжения ротор притягивается к статору. Далее под ротор сквозь форсунки нагнетают воздух в сжатом виде, вследствие чего появляется сила, отталкивающая ротор от статора. Так между ними возникает воздушная подушка и ротор висит над статором с наличием минимально зазора. Это и обеспечивает минимум сопротивления движения ротора и высокоточное позиционирование.

### Режимы работы синхронного шагового двигателя

Привод способен работать устойчиво при условии отсутствия потерь шагов во время отработки угла при подаче на обмотки управления импульсных серий. При отработке каждого шага ротор имеет уверенное равновесие по отношению к вектору магнитной индукции, относящейся к магнитному полю статора.

Режим отработки каждого шага должен соответствовать количеству импульсов управления, которые подаются на обмотки привода, а он при этом, до момента прихода следующего импульса, должен отработать заданный ему угол вращения. В начале каждого из шагов угловая двигательная скорость должна быть нулевой.

Допускаются колебания углового приводного вала по отношению к установившемуся значению. Они обуславливаются наличием кинетической

энергии, которая накапливается двигательным валом во время отработки угла. При этом энергия способна преобразовываться в *потери*:

- магнитные;
- механические;
- электрические.

Чем больше их величина, тем быстрее кончается процесс перехода отработки одного шага приводом.

При запуске ротор может иметь отставание от статорного потока на шаг и даже больше, вследствие чего получается расхождение между количеством роторных шагов и статорным потоком.

*Ключевые характеристики* шагового двигателя – это:

- шаг;
- предельная механическая характеристика;
- приемистость.

Предельная характеристика представляет собой зависимость максимально возможного синхронизирующего момента от частот управляющих импульсов.

А приемистостью называется частота этих импульсов, которая исключает возможность потерь или добавлений шага во время обработки. Приемистость считается ключевым показателем режима перехода в двигателе. Она способна расти вместе с синхронизирующим моментом, снижением шага, инерционным моментом линейно перемещаемых или вращаемых частиц, а также статического момента сопротивления.

### Особенности подключения шагового двигателя



Рис. 130. Подключение шагового двигателя

Подключить двигатель шагового типа можно по той или иной схеме, которая зависит от количества проводов и способов запуска (рис. 130).

Двигатели могут иметь от четырех до восьми проводов. Если их всего четыре, то применение двигателя возможно только с биполярным устройством. Каждая фазная обмотка, которых всего две, оснащена двумя проводами. Определять проводные пары следует с использованием метра, затем подключается драйвер пошаговым методом.

Мотор, оснащенный шестью проводами, включает в себя два провода для каждой обмотки и центральный кран, тоже для каждой из них. Его можно подключать и к однополярному, и к биполярному устройству. Для разделения привода следует применять специальный прибор для измерения. К однополярному устройству привод можно подключать с использованием всех шести проводов, а к однополярному будет достаточно одного конца и одного центрального крана от каждой обмотки.

Пятипроводной мотор практически не отличается от предыдущего, однако его центральные клеммы изнутри соединены как один сплошной кабель и имеют один выход к одному из проводов. Не следует отделять обмотки друг от друга, иначе можно их разорвать. Вместо этого лучше определить центр провода и соединить его с другими проводниками. Это будет максимально эффективным решением подключения. После этого можете подключать само устройство и проверять его на работоспособность.

### **Ключевые технические характеристики двигателей**

Первичная обмотка при постоянном токе создает номинальное напряжение. А первоначальная скорость крутящего момента привода меняется вместе с током. От того, какова схема двигателя и от индуктивности его обмоток зависит время снижения линейного момента на более высоких скоростях. Некоторые марки двигателей, имеющие степень защиты IP65, способны работать в самых трудных условиях.

Если вы желаете выбрать готовую модель шагового двигателя отечественного производства, обратите внимание на основные технические характеристики наиболее известных моделей:

ШД-1 – градус шага равен 15; 4 фазы, крутящий момент составляет 40 Нт;

ДШ-0,04А – градус шага 22,5; 4 фазы, крутящий момент 100 Нт;

ДШИ 200 – градус шага 1,8; 4 фазы, крутящий момент 0,25 Нт;

ДШ-6 – градус шага – 18; 4 фазы, крутящий момент 2 300 Нт.

Также среди покупателей спросом пользуются такие модели, как:

- четырехфазный ДШР-40;
- SM-200-0.22;
- Purelogic R&D с энкодером;
- NEMA 23;



- STH-39D1112;
- SP-57;
- SanyoDenkiSM28.

При подборе нужного двигателя необходимо произвести расчет параметров мощности, напряжения и крутящего момента.

Одной из проблем работы шагового двигателя является управление приборов при отсутствии контроллера. Чтобы с этим справиться, следует взять специальный блок логической связи, помогающий управлять двигателем при отсутствии соответствующей микросхемы. Однако лучше всего контролировать работу шаговых двигателей при помощи специального контроллера.

### **Управление и режимы работы шаговых двигателей**

Применяемые в настоящее время шаговые двигатели в подавляющем большинстве являются многофазными и многополюсными синхронными электрическими машинами. В отличие от синхронных двигателей обычного исполнения их роторы не имеют пусковой короткозамкнутой обмотки, что обуславливается частотным (а не асинхронным) пуском шаговых двигателей. Роторы шаговых двигателей могут быть *возбужденными – активными* или *невозбужденными – пассивными*.

На рис. 131 изображена схема  $m$ -фазного шагового двигателя. Для упрощения анализа физических процессов рассмотрим работу этого двигателя с невозбужденным двухполюсным ротором.

Питание обмоток статора может быть однополярным либо двухполярным. При однополярной питании напряжение изменяется от 0 до  $+U$ : при двухполярном от  $+U$  до  $-U$ .

Современные электронные коммутаторы могут обеспечивать питание обмоток статора либо порознь, либо группами в различных сочетаниях. Каждому состоянию – такту коммутации, число которых зависит от способов включения обмоток, соответствуют вполне определенные величины и направления векторов результирующей м.д.с.  $\bar{F}$  и потока двигателя  $\Phi$ , а следовательно, и вполне определенное положение ротора в пространстве.

Так, если обмотки рассматриваемого двигателя питать поочередно (1-2-3-...- $m$ ) однополярными импульсами, то ротор двигателя будет иметь  $m$  устойчивых положений, которые совпадают с осями обмоток (рис. 131, *а* и *в*).

На практике для увеличения результирующей м.д.с., магнитного потока и синхронизирующего момента обычно одновременно питаются две, три и большее количество обмоток. При этом ротор двигателя в режиме холостого хода занимает положения, в которых его ось совпадает с результирующим вектором м.д.с. В случае, когда питается четное число обмоток, положение результирующего вектора м.д.с. и ротора совпадает с линией, проходящей между двумя средними обмотками (рис. 131, *б*). В случае, ко-

гда питается нечетное число обмоток, устойчивые положения ротора совпадают с осью средней обмотки (рис. 131, а). Таким образом, в обоих случаях ротор двигателя будет иметь  $m$  устойчивых положений. Однако соседние положения при этом будут смещены на угол  $2\pi/(2m) = \pi/m$ .

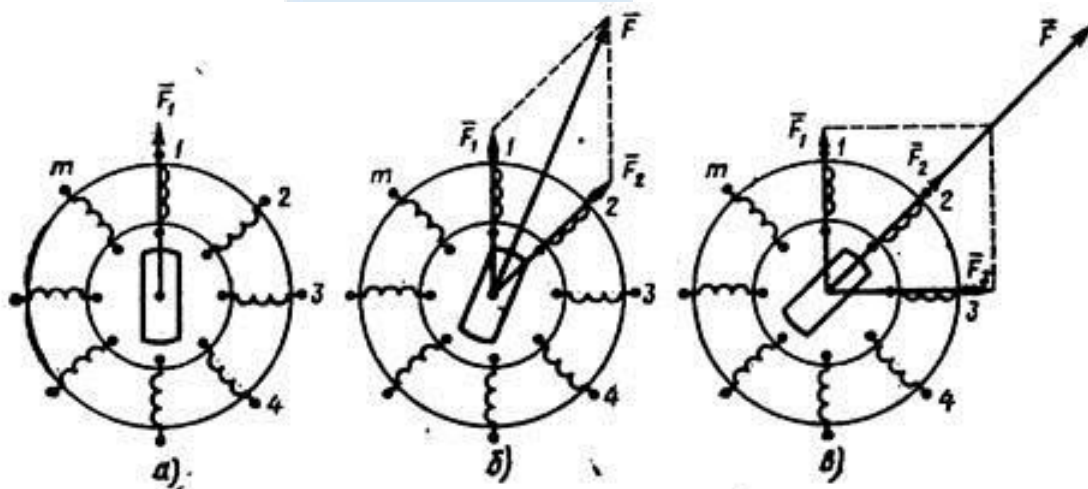


Рис. 131. К вопросу о принципе действия  $m$ -фазного шагового двигателя

Если поочередно включать, то четное, то нечетное число обмоток, например, 1-2, 2, 2-3, 3, ...,  $m-1$ , то число устойчивых положений ротора увеличится вдвое:  $n = 2m$ .

На практике управление двигателя, при котором обмотки включаются поочередно равными группами по два, три и т. д., называют *симметричным*. Поочередное включение неравных групп обмоток называют *несимметричным* управлением.

Кроме однополярного и двухполярного, симметричного и несимметричного способов управления шаговыми двигателями различают еще потенциальный и импульсный способы управления.

При *потенциальном управлении* напряжения на обмотках изменяются только в моменты поступления управляющего сигнала – команды. При отсутствии последующего сигнала управления одна или группа обмоток, возбужденные предшествующим сигналом, остаются под напряжением, и ротор занимает вполне определенное фиксированное положение.

При *импульсном управлении* любая обмотка (или группа обмоток), возбужденная сигналом – импульсом управления, по истечении некоторого времени, определяемого длительностью импульса, автоматически отключается. Фиксация положения ротора в период паузы между импульсами обеспечивается либо внутренним реактивным моментом (если ротор активный), либо специальными магнитными или иными фиксирующими устройствами.

Кроме двухполюсных, широко используются также *многополюсные* ( $2p > 2$ ) шаговые двигатели. Ротор ненагруженного моментом сопротивления многополюсного шагового двигателя при одном и том же питании обмоток

может находиться в одном из  $p$ -устойчивых положений. Таким образом, в  $m$ -фазном двигателе может быть либо  $pm$ -устойчивых положений (при симметричном управлении), либо  $2pm$  положений (при несимметричном управлении).

Современные электронные коммутаторы допускают переход от симметричного к несимметричным способам управления; от питания одной обмотки к питанию нескольких обмоток и т. п. Все это позволяет в довольно широких пределах менять величину шага у одного и того же двигателя, производить его реверс, торможение и т. д.

Характер движения ротора шагового двигателя определяется частотой и характером изменения управляющих импульсов. В зависимости от этого различают следующие режимы работы шаговых двигателей: 1) статический; 2) квазистатический; 3) установившийся; 4) переходный.

*Статическим режимом* шагового двигателя называется режим, при котором по обмоткам статора протекает постоянный ток; ток создает неподвижное в пространстве магнитное поле, и ротор двигателя не вращается. Под действием момента нагрузки ротор может лишь отклоняться на некоторый угол от положения устойчивого равновесия.

*Квазистатический режим* работы – это режим отработки единичных шагов, при котором переходные процессы, сопровождающие отработку шага, к началу следующего шага полностью заканчиваются, и частота вращения ротора в начале каждого шага равна нулю. Предельная частота импульса, при которой еще обеспечивается квазистатический режим, определяется временем протекания электромагнитных переходных и особенно механических переходных процессов, т. е. временем колебаний (качаний) ротора. Для уменьшения или полного устранения качаний ротора в конце шага применяют различные демпфирующие устройства.

Наиболее радикальным методом устранения качаний ротора, а следовательно, увеличения предельной частоты квазистатического режима является гашение кинетической энергии, запасенной ротором при отработке шага, которое достигается за счет принудительного или естественного торможения ротора (старт-стопное управление).

*При принудительном торможении* после перевода управляющего импульса с первой обмотки (или группы обмоток) на вторую через некоторый промежуток времени, за который ротор отработывает часть шага и запасает определенное количество кинетической энергии, управляющий импульс переводится снова на первую обмотку. На ротор начинает действовать тормозящий его движение момент. При правильном выборе времени и величины тормозящего момента ротор останавливается в конце шага. После чего управляющий импульс вновь переводится на вторую обмотку и ротор, отработав шаг, фиксируется практически без колебаний.

*При естественном торможении* отработка шага происходит в два этапа: на первом этапе движение ротора осуществляется за счет положи-

тельного синхронизирующего момента, возникающего в результате сдвига м.д.с. статора на часть полного шага; на втором этапе – за счет кинетической энергии, запасенной ротором при отрицательном (тормозном) моменте. При перемещении ротора на величину полного шага м.д.с. сдвигается на оставшуюся часть шага и фиксирует ротор в этом положении. Естественное торможение применимо лишь в тех двигателях, у которых полный шаг делится на несколько элементарных шагов.

*Установившийся режим* работы шаговых двигателей – режим, соответствующий постоянной частоте управляющих импульсов. Ротор двигателя в установившемся режиме, имея постоянную среднюю частоту вращения, может совершать как периодические, так и непериодические колебания.

*Переходные режимы* работы шаговых двигателей – пуск, ускорение, замедление, реверс – являются основными эксплуатационными режимами работы большинства шаговых двигателей. Физические процессы, происходящие в переходных режимах, определяются как параметрами двигателя и его нагрузки, так и начальными условиями, при которых начинается переходный процесс.

Основным требованием, которое предъявляется к шаговым двигателям в переходных режимах, является требование отсутствия потери шага, т. е. сохранения синхронизма при любом характере изменения частоты управляющих импульсов.

*Основными параметрами*, которые определяют качество работы шагового двигателя в переходных режимах, являются следующие:

1) частота собственных круговых колебаний, зависящая от числа пар полюсов  $p$ , амплитуды статического синхронизирующего момента  $M_{MAX}$  и момента инерции ротора  $J$ :

$$\omega_0 = \sqrt{pM_{MAX}J};$$

2) электромагнитная постоянная времени, зависящая от индуктивности обмоток  $L$  и их активного сопротивления  $r$ :

$$T_{эм} = L/r;$$

3) коэффициент внутреннего демпфирования, зависящий от амплитуды потокосцепления и активного сопротивления обмоток статора  $r$ :

$$D = \psi_{max}^2/R/.$$

*Рабочие характеристики* шаговых двигателей определяются как параметрами самих двигателей и характером их нагрузки, так и особенностями электронного коммутатора.

В связи с многообразием рабочих режимов рабочие характеристики шаговых двигателей весьма разнообразны. В качестве примера рассмотрим предельные динамические характеристики пуска двигателя типа ШД-2-5, представляющие собой зависимость частоты приемистости  $f$  от момента сопротивления нагрузки  $M_C$ . Из представленных на рис. 132 двух динамических характеристик видно, что с увеличением момента сопротивления ча-

стота приемистости снижается. При этом характеристика 1 двигателя, соответствующая моменту инерции нагрузки  $J_H = 0,03 \text{ кг}\cdot\text{см}^2$ , располагается выше характеристики 2, соответствующей моменту инерции  $J_H = 0,24 \text{ кг}\cdot\text{см}^2$ .

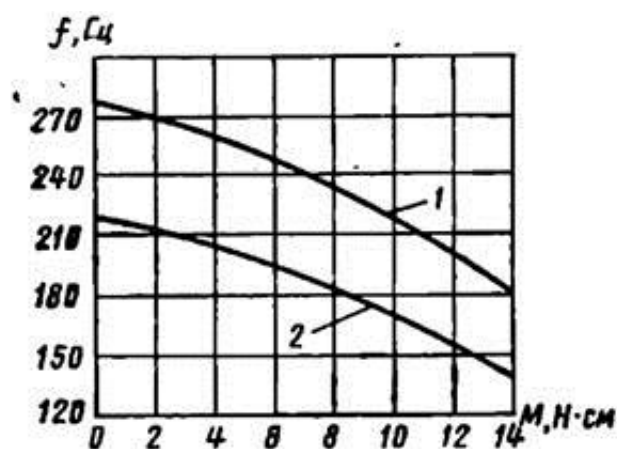


Рис. 132. Предельные динамические характеристики пуска шагового двигателя

В настоящее время разработано большое количество шаговых двигателей различных конструкций. На рис. 133 показано устройство шагового двигателя типа ШД-2. В расточке статора 1 расположен активный ротор — звездочка 2, представляющий постоянный магнит.

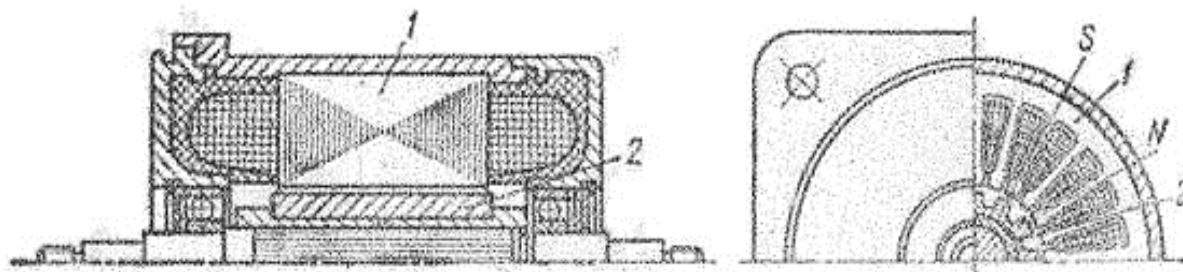


Рис. 133. Устройство шагового двигателя типа ШД-2

### Недостатки и достоинства шаговых двигателей

*Преимущества шаговых двигателей:*

- точное позиционирование без обратной связи, число импульсов определяет угол поворота;
- двигатель обеспечивает полный крутящий момент при снижении скорости вращения, вплоть до остановки;
- двигатель фиксирует свое положение при остановке за счет тока удержания;

- регулировка скорости вращения с высокой точностью без обратной связи;
- способность быстрого старта, остановки, реверса;
- высокая надежность;
- отсутствие коллекторных щеток.

*Недостатки шаговых двигателей:*

- сложная *система управления*;
- невысокие скорости вращения;
- возможно явление резонанса;
- может произойти потеря позиционирования при механических перегрузках;
- низкая удельная мощность.

### **Промежуточное тестирование**

1. Шаговый двигатель: определение, конструкция, назначение, типы.
2. Принцип действия шагового двигателя.
3. Режимы работы шагового двигателя, их характеристика.

БГАРФ

## ГЛАВА 13. Показатели надежности и долговечности элементов и функциональных устройств судовой автоматики.

Эксплуатационные факторы (температура, влажность, загрязнения воздуха парами топлива и масла, механические воздействия, уровень помех), влияющие на работоспособность элементов и функциональных устройств судовой автоматики

### Надежность элементов систем автоматики

Надежность систем автоматики – это способность сохранять наиболее существенные свойства на заданном уровне в процессе эксплуатации. Для надежной работы системы необходимо использовать элементы, обладающие хорошими показателями надежности. Это особенно важно в связи с возрастающим многообразием систем автоматики, применением их для выполнения очень ответственных задач. Но чем сложнее эти системы, чем большее число элементов они содержат, тем больше появляется причин для снижения надежности. Возникает противоречие: чем ответственнее и сложнее задача, выполняемая системой автоматики, тем меньше может оказаться надежность этой системы. Основными путями преодоления этого противоречия являются следующие. Прежде всего это повышение надежности элементов автоматики, кроме того, разработка методов *создания надежных систем, состоящих из ненадежных элементов*; разработка систем контроля, предупреждающих и обнаруживающих отказы; разработка методов обслуживания сложных систем.

Рассмотрим основные показатели надежности, по которым оцениваются элементы автоматики. При оценке надежности используется термин «отказ». Отказами в работе элемента называют как выход из строя, так и изменение его параметров, приводящее к неудовлетворительному выполнению элементов его функций. Отказы, как правило, появляются внезапно, случайно, т. е. подчиняются законам, свойственным случайным величинам. Их изучают с помощью математической статистики. Для количественной оценки надежности элементов автоматики обычно используют следующие показатели:  $P(t)$  – вероятность безотказной работы в течение заданного отрезка времени;  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов;  $T_{cp}$  – среднее время безотказной работы.

Основной количественной характеристикой надежности является вероятность безотказной работы  $P(t)$  – вероятность того, что за время  $t$  не произойдет отказа в работе. Эта величина может находиться в пределах от 0 до 1.

$$P(0) = 1; P(\infty) = 0; 0 \leq P(t) \leq 1.$$

На рис. 134 показан график функции  $P(t)$ . Вероятность безотказной работы элемента автоматики можно определить по результатам испытаний

большого количества одинаковых элементов в течение заданного промежутка времени  $t$

$$P(t) = \frac{N-n}{N},$$

где  $N$  – общее число испытанных элементов;  $n$  – число элементов, вышедших из строя за время испытаний.

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$ , или  $\lambda$ -характеристика, очень часто используется для количественной оценки надежности элементов и при расчете надежности системы автоматики, состоящей из нескольких элементов. Величину  $X$  можно оценить как отношение числа отказавших элементов к числу оставшихся к данному моменту времени работоспособными элементами, взятое за единицу времени (рис. 134).

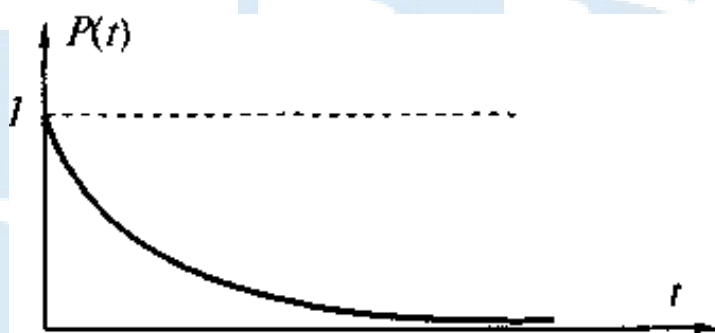


Рис. 134. Зависимость безотказной работы элемента от времени работы

Обычно единицей измерения интенсивности отказов является число отказов в час. Типичная кривая интенсивности отказов в зависимости от времени эксплуатации для большого числа однотипных элементов, изготовленных на одном и том же заводе по одинаковой технологии, приведена на рис. 135. На этой кривой можно выделить три характерных участка. Первый участок от 0 до  $t_1$  – называют периодом приработки и тренировки. В этот период выходят из строя некачественно изготовленные элементы. Обычно этот период проходит на заводе-изготовителе, дорожающем своей репутацией. Дефектные элементы заранее, как говорится, «выжигают», а не пускают в продажу. Второй участок (от  $t_1$  до  $t_2$ ) – это период нормальной эксплуатации элемента, в течение которого интенсивность отказов низкая и примерно постоянная. На этом участке вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Третий участок начинается с момента  $t_2$  и характеризуется нарастанием интенсивности отказов, что объясняется старением и износом элементов. Обычно рекомендуется произвести замену элементов до наступления момента времени  $t_2$ .



Среднее время безотказной работы при постоянной интенсивности отказов определяется очень просто:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}.$$

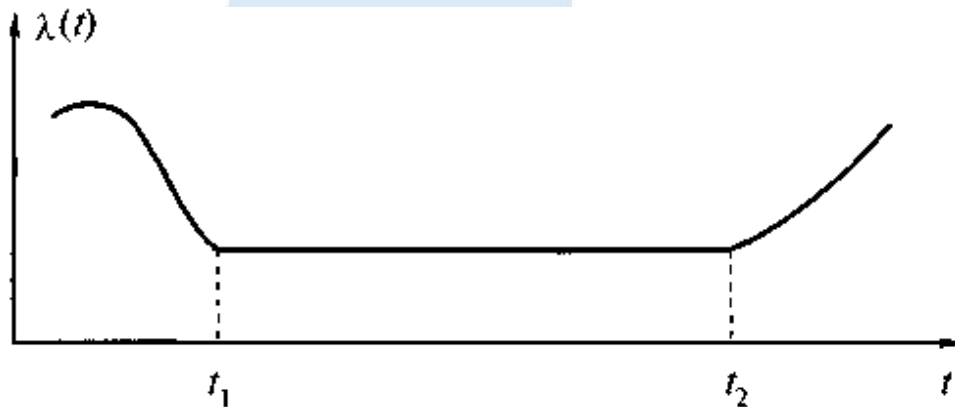


Рис. 135. Типичная зависимость интенсивности отказов от времени

Следует отметить, что на величину интенсивности отказов и, соответственно, на среднее время безотказной работы очень сильно влияют условия эксплуатации.

Объективная необходимость непрерывного повышения надежности судов и судовых технических средств стимулирует изучение фактического уровня надежности оборудования, применяемого на судах, и использование полученных результатов для разработки организационных и технических мероприятий, направленных на устранение обнаруженных конструктивных недостатков, причин отказов, на совершенствование системы технической эксплуатации. Рассмотрим некоторые обобщенные показатели, характеризующие уровень надежности современных технических средств судов.

### **Безотказность**

Наиболее подробно исследованы к настоящему времени показатели безотказности как основного свойства надежности, обеспечивающего бесперебойную эксплуатацию судов.

### **Главные малооборотные двигатели**

Наиболее характерным показателем надежности главного двигателя является наработка на одну вынужденную остановку судна в море. Для современных теплоходов этот показатель изменяется от 330 до 645 ч при продолжительности стоянки 70÷137 мин. Наименее надежными узлами главных двигателей являются цилиндропоршневая группа (ЦПГ) ( $k_0 = 25\%$ ) и топливная аппаратура ( $k_0 = 30\%$ ). Время безотказной работы многих деталей (поршни, цилиндры, втулки, подшипники и т. д.) согласуется с законом гамма-распределения.

### **Вспомогательные механизмы энергетической установки**

В табл. 2 приведены значения среднего времени безотказной эксплуатации  $\bar{T}_3$  некоторых вспомогательных механизмов.

Таблица 2

#### **Среднее время безотказной эксплуатации некоторых вспомогательных механизмов**

<b>Наименование механизма</b>	<b><math>\bar{T}_3</math>, тыс. час</b>	<b>Наименее надежные элементы и их коэффициенты отказов <math>k_0</math>, %</b>
Компрессоры пускового воздуха	5÷9	Клапаны 50-90; ЦПГ 3-14; подшипники 2-14.
Насосы центробежные	10÷26	Уплотнения 40-70; подшипники 12-30; валы 10-30; рабочие колеса 3-16.
Насосы поршневые	8÷13	Кольца поршневые 10-37; клапаны 29-62; подшипники 5; сальники 7-17.
Сепараторы центробежные	13÷28	Прокладки барабана 10-29; червяные передачи 11-26; муфты 10-30; подшипники 5-28

### **Электрооборудование**

В первые полтора-два года эксплуатации наблюдается повышенная в 2-3 раза частота отказов (параметр потока отказов  $\omega$ ); после указанного периода приработки значение  $\omega$  стабилизируется вокруг установившегося значения  $\omega_{уст}$ . Эта закономерность характерна для всех видов электрооборудования. Количество отказов за равные промежутки времени, как правило, согласуется с законом Пуассона. Из всех отказов электрооборудования отказы кабелей и арматуры сети освещения составляют (в процентах): 40-50, аппаратуры электроприводов 25-40, электродвигателей 5-8, электронагревательных приборов 5-8, распределительных устройств 2-6, силовых кабелей 2-4, источников электроэнергии 1-2.

### **Средства автоматизации**

Многочисленные исследования показали, что время безотказной эксплуатации систем и средств автоматизации распределено по экспоненциальному закону. Учитывая различия в сложности и конструктивном исполнении элементов и схем автоматики, различный уровень качества исходных материалов и исполнения, не представляется возможным дать обобщенную оценку безотказности систем и средств автоматизации. Можно лишь привести примеры по конкретным системам. Так, время безотказной эксплуатации  $\bar{T}_3$  систем ДАУ и САУ судов типа «Новгород» составляет (в часах): для системы ДАУ главного двигателя – 690, системы централизованного контроля – 540, ДАУ вспомогательных двигателей – 4 600, САУ насосов главного двигателя – 2 200, САУ компрессоров – 17 280, САУ и контроля

сепараторов – 2 420, ДАУ клапанами топливной и балластной систем – 4 600, САУ вспомогательного котла – 6 280, системы авторегулирования температуры охлаждающей забортной воды – 2 200, САУ рулем – 6 050.

### ***Гребные винты и валопроводы***

Гребные винты, как правило, являются объектами, не восстанавливаемыми в судовых условиях. Поэтому показатель безотказности (средняя наработка до отказа) совпадает с показателем долговечности – ресурсом до капитального ремонта или до замены (списания). По данным обследования 360 торговых судов и большого количества военных кораблей США, для 50 % судов капитальный ремонт гребных винтов, изготовленных из марганцовистой бронзы, потребовался через 10 лет эксплуатации и ранее, а 35 % винтов были заменены в первые 5 лет. Отказы гребных валов происходят, как правило, вследствие развития явлений усталости. Согласно результатам обследований одновалных морских судов США, более 30 % всех валов имели срок службы до 3 лет и лишь 13 % – от 9 до 12 лет.

### ***Долговечность***

Определение показателей долговечности судовых технических средств опытным путем представляет наиболее сложную задачу, так как для многих судовых систем, машин и механизмов срок службы составляет 10 и более лет, в течение которых происходят существенные изменения в конструкции и технологии изготовления новых изделий аналогичного назначения. Поэтому для таких агрегатов и механизмов сроки службы устанавливаются исходя из схемы ТЭ судна с учетом опыта эксплуатации аналогичных изделий предыдущих выпусков. Нормированные показатели при проектировании обеспечиваются соответствующими расчетами прочности.

В большинстве случаев срок службы основных агрегатов и механизмов принимается равным нормативному сроку службы судна (20-25 лет) либо сроку службы до большого ремонта судна.

В то же время для ряда элементов судна срок службы устанавливается, основываясь на средней скорости (интенсивности) износа или коррозии, предельно допустимом износе.

Средний срок службы судовых трубопроводов составляет от 5,7 до 9 лет; меньшие значения – для стальных оцинкованных и медных труб в общесудовых и санитарных системах. Исключение составляют стальные трубы с резиновыми покрытиями и полихлорвиниловые трубы, расчетный срок службы которых значительно выше. Средний срок службы, количество лет до капитального ремонта некоторых судовых механизмов и устройств составляет: люковые закрытия и их приводы – 8, донно-забортная арматура – 8, грузовые стрелы и блоки – 6-10, гребные винты – 6-10, насосы – 8, вентиляторы – 10, рулевые машины 9, краны, лебедки грузовые – 10-14, испарители – 4, опреснители, водонагреватели, маслоохладители – 8.

### ***Ремонтопригодность***

Характерным показателем ремонтпригодности СЭУ и, в частности, главного двигателя, является среднее время простоя судна при вынужденной остановке в море, равное  $1 \div 2,5$  ч, которое может рассматриваться как среднее время восстановления  $\bar{T}_в$ .

При оценке надежности двигателей широко применяется в качестве показателя ремонтпригодности трудоемкость одного ТО основных узлов дизеля.

Для некоторых вспомогательных механизмов устранение отказов деталей и узлов совмещается по времени с ТО (переборкой) всего механизма. Трудоемкость одной переборки  $H_{ТО1}$ , как показатель ремонтпригодности, составляет (в чел.-ч): 10-30 для центробежных насосов, 36-60 для компрессоров пускового воздуха, 14-29 для центробежных сепараторов, 29-33 для поршневых насосов.

Для электрооборудования судна в целом  $\bar{T}_в = 3,9$  ч,  $\bar{H}_в = 5,6$  чел.-ч. При этом наименьшие значения  $\bar{T}_в = 2,4$  ч и  $\bar{H}_в = 3$  чел.-ч характерны для аппаратуры коммутации, защиты и управления, а наибольшие  $\bar{T}_в = 16$  ч и  $\bar{H}_в = 22$  чел.-ч – для электродвигателей. Среднее время восстановления аппаратуры автоматики составляет 0,5-2 ч.

### ***Комплексные показатели надежности***

Наиболее характерными комплексными показателями надежности судна в целом являются: коэффициент технического использования  $K_{т.и.}$ , удельная трудоемкость технического обслуживания (ТО)  $H_{то}$  и ремонта  $h_p$  за год, удельная стоимость ТО  $C_{то}$  и ремонта  $C_p$  за год эксплуатации. Их значения учитывают безотказность, ремонтпригодность и долговечность сложных систем, агрегатов и их элементов. Оценка технико-экономической эффективности судов не может быть произведена без учета указанных выше показателей надежности.

Для комплектующего оборудования  $k_{ти}$  и  $k_r$  не являются достаточно наглядными показателями, так как их значения обычно близки к единице, а наиболее трудоемкий ремонт оборудования производится при заводском ремонте судна, длительность которого, как правило, определяется объемом корпусных работ. Поэтому основным комплексным показателем надежности комплектующего оборудования является удельная трудоемкость ТО, приведенная к определенному периоду эксплуатации, наработке и т. д. (например, за год эксплуатации, за 1 000 ч работы, на 1 цилиндр и т. п.), которая используется при планировании работ судовых экипажей и судовых ремонтных бригад. Этот показатель применяется для агрегатов, машин и механизмов в целом, а также для их узлов, блоков и деталей.

По эксплуатационным данным трудоемкость ТО главного двигателя за 1 000 ч работы, приведенная к 1 000 э.л.с, составляет (в чел.-ч): для двигателя 6RD-76 Зульцер – 84, для 7ДКРН74/160 – 176, для K8Z 70/120E Ман – 157.

Наиболее трудоемкими (в обслуживании) узлами главных двигателей являются: цилиндропоршневая группа (20-43 % общей трудоемкости ТО), крышки с клапанами (10-24 %), топливная аппаратура (13-35 %), турбокомпрессоры (10-30 %) и подшипники (10-17 %).

Трудоемкость ТО вспомогательных двигателей на один цилиндр за 1 000 ч работы составляет (в чел.-ч): 32,1 для двигателя ВАН-22; 39,3 для 25 МТВН-40; 33 для NVD-36 и 33 для ЧН 25/34.

Удельная (годовая) трудоемкость ТО вспомогательных механизмов составляет (в чел.-ч): компрессоров пускового воздуха – 32-110, центробежных насосов – 10-20, поршневых насосов – 20-35, сепараторов – 5-19. Годовая трудоемкость ТО электрооборудования составляет 2 500-3 500 чел.-ч.

Приведенные выше комплексные показатели надежности являются средними за период эксплуатации до капитального ремонта или до списания. В действительности, под влиянием многих факторов, определяющих объем и характер работ по ТО и ремонту, *весь срок службы судна можно разделить на четыре периода.*

*Первый период* – освоение судна, обнаружение и устранение построечных дефектов – продолжается 1,5-2 года и характеризуется повышенной потребностью в ТО.

*Второй период* – с 3-го по 9-й год службы – период стабильного и эффективного использования с наименьшими трудозатратами на ТО и ремонт.

*Третий период* – с 10 до 20 лет – характеризуется возрастающим объемом работ.

*Четвертый период* – последующие годы до списания – период наибольшей удельной трудоемкости.

При этом под каждым отдельным фактором понимают существенное обстоятельство, наличие или отсутствие которого увеличивает вероятность возникновения аварийной ситуации. Анализ причин аварий показывает, что все множество факторов, обуславливающих их возникновение, можно объединить в три группы:

- технические;
- эксплуатационные;
- субъективные.

### **Технические факторы**

К основным техническим факторам, влияющим на техническую безопасность эксплуатации судов, относятся:

- надежность судовых технических средств, устройств и корпуса судна;
- степень автоматизации СЭУ (А1, А2, А3);
- категории ледовых усилений корпуса судна (УЛА, УЛ, Л1-Л4), количество и типы закрытия корпуса судна (закрытие трюмов, носовые, кор-

мовые и бортовые закрытия ролкеров и пассажирских паромов типа ро-ро, водонепроницаемые двери надстроек и смежных отсеков и т. п.), степень оснащения судовых технических средств средствами аварийно-предупредительной сигнализации и защиты, степень оснащения судна противопожарной техникой, системами тушения пожара и средствами обнаружения пожарной опасности и возникновения возгорания;

– степень оснащения судна средствами контроля и технической диагностики;

– степень оснащения судна грузоподъемными устройствами, как при грузовых операциях, так и для обслуживания судовых технических средств (СТС) судна.

### **Эксплуатационные факторы**

К эксплуатационным факторам, оказывающим влияние на техническую безопасность эксплуатации судов, относятся:

– возраст судов;

– условия внешней среды;

– свойства перевозимых грузов;

– численность судовых экипажей;

– назначение режимов работы СЭУ;

– качества применяемых топлив, смазочных масел и технической воды;

– своевременность и качество заводского ремонта;

– обеспеченность судов сменно-запасными частями и материалами;

качество инструкций по технической эксплуатации и документации

Опыт эксплуатации показывает, что надежность работы электрооборудования зависит от многочисленных и разнообразных факторов, которые условно могут быть разделены на четыре группы; конструктивные, производственные, монтажные, эксплуатационные.

**Конструктивные** факторы обусловлены установкой в устройство малонадежных элементов; недостатками схемных и конструктивных решений, принятых при проектировании; применением комплектующих элементов, не соответствующих условиям окружающей среды.

**Производственные** факторы обусловлены нарушениями технологических процессов, загрязненностью окружающего воздуха, рабочих мест и приспособлений, слабым контролем качества изготовления и монтажа и др.

В процессе монтажа электротехнических устройств их надежность может быть снижена при несоблюдении требований технологии.

Условия эксплуатации оказывают наибольшее влияние на надежность электротехнических устройств. Удары, вибрация, перегрузки, температура, влажность, солнечная радиация, песок, пыль, плесень, коррозия жид-

кости и газы, электрические и магнитные поля – все влияет на работу устройств.

Различные условия эксплуатации по-разному могут сказываться на сроке службы и надежности работы электроустановок. Ударно-вибрационные нагрузки значительно снижают надежность электротехнических устройств.

Воздействие ударно-вибрационных нагрузок может в ряде случаев быть значительнее воздействия других механических, а также электрических и тепловых нагрузок. В результате длительного знакопеременного воздействия даже небольших ударно-вибрационных нагрузок происходит накопление усталости в элементах, что приводит обычно к внезапным отказам. Под воздействием вибраций и ударов возникают многочисленные механические повреждения элементов конструкции, ослабляются их крепления и нарушаются контакты электрических соединений.

Нагрузки при циклических режимах работы, связанных с частыми включениями и выключениями электротехнического устройства, так же, как и ударно-вибрационные нагрузки, способствуют возникновению и развитию признаков усталости элементов.

Физическая природа повышения опасности отказов устройств при их включении и выключении заключается в том, что во время переходных процессов в их элементах возникают сверхтоки и перенапряжения, значение которых часто намного превосходит (хотя и кратковременно) значения, допустимые техническими условиями.

Электрические и механические перегрузки происходят в результате неисправности механизмов, значительных изменений частоты или напряжения питающей сети, загустения смазки механизмов в холодную погоду, превышения номинальной расчетной температуры окружающей среды в отдельные периоды года и дня и т. д.

Перегрузки приводят к повышению температуры нагрева изоляции электротехнических устройств выше допустимой и резкому снижению срока ее службы.

Климатические воздействия, более всего температура и влажность, влияют на надежность и долговечность любого электротехнического устройства.

При низких температурах снижается ударная вязкость металлических деталей электротехнических устройств: меняются значения технических параметров полупроводниковых элементов; происходит «залипание» контактов реле; разрушается резина.

Вследствие замерзания или загустения смазочных материалов затрудняется работа переключателей, ручек управления и других элементов. Высокие температуры также вызывают механические и электрические повреждения элементов электротехнического устройства, ускоряя его износ и старение.

Влияние повышенной температуры на надежность работы электротехнических устройств проявляется в самых разнообразных формах: образуются трещины в изоляционных материалах, уменьшается сопротивление изоляции, а значит, увеличивается опасность электрических пробоев, нарушается герметичность (начинают вытекать заливочные и пропиточные компаунды).

В результате нарушения изоляции в обмотках электромагнитов, электродвигателей и трансформаторов возникают повреждения. Заметное влияние оказывает повышенная температура на работу механических элементов электротехнических устройств.

Под влиянием влаги происходит очень быстрая коррозия металлических деталей электротехнических устройств, уменьшается поверхностное и объемное сопротивление изоляционных материалов, появляются различные утечки, резко увеличивается опасность поверхностных пробоев, образуется грибковая плесень, под воздействием которой поверхность материалов разъедается и электрические свойства устройств ухудшаются.

Пыль, попадая в смазку, оседает на частях и механизмах электротехнических устройств и вызывает быстрый износ трущихся частей и загрязнение изоляции. Пыль наиболее опасна для электродвигателей, в которые она попадает с засасываемым для вентиляции воздухом. Однако и в других элементах электротехнических устройств износ намного ускоряется, если пыль проникает сквозь уплотнения к поверхности трения. Поэтому при большой запыленности особое значение приобретает качество уплотнений элементов электрических устройств и уход за ними.

Качество эксплуатации электротехнических устройств зависит от степени научной обоснованности применяемых методов эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала (знание материальной части, теории и практики надежности, умение быстро находить и устранять неисправности и т. п.).

Применение профилактических мероприятий (регламентные работы, осмотры, испытания), ремонта, использование опыта эксплуатации электротехнических устройств обеспечивают их более высокую эксплуатационную надежность.

### **Промежуточное тестирование**

1. Что такое надежность систем автоматики?
2. Показатели надежности.
3. Факторы, влияющие на надежность судна: классификация и краткое описание.



**ИТОГОВЫЙ ТЕСТ (ЭКЗАМЕН) ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ЭЛЕМЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ»**

**1. На какие группы не подразделяются указывающие и регистрирующие устройства?**

- А) прямого преобразования
- Б) следящие
- В) развёртывающие и цифровые
- Г) вторичного преобразования

**2. В электронных усилителях в качестве усилительных приборов не используются?**

- А) электронные лампы
- Б) транзисторы
- В) тиристоры
- Г) тиратроны

**3. Какой из стабилизаторов напряжения является простейшим?**

- А) газовый стабилизатор
- Б) стабилизатор постоянного напряжения
- В) стабилизаторы переменного тока
- Г) феррорезонансный стабилизатор

**4. Эти запоминающие устройства выполняют запись и хранение произвольной двоичной информации, в цифровых системах хранят массивы обрабатываемых данных и программы, определяющие процесс текущей обработки информации.**

- А) внешние
- Б) внутренние
- В) оперативные
- Г) постоянные

**5. Устройство для расшифровки сообщения и перевода содержащейся в нём информации на язык (код) воспринимающей системы.**

- А) дешифратор
- Б) операнды
- В) селектор
- Г) байт

**6. Электромеханическое устройство для приёма сигналов вызова.**

- А) дешифратор
- Б) операнды
- В) селектор
- Г) байт

**7. К какому элементу автоматики относится определение:** элемент, в котором выходная величина имеет такую же физическую природу, как входная, а преобразования происходят лишь качественные (выходная величина всегда больше входной)?

- А) усилитель
- Б) датчик
- В) стабилизатор
- Г) переключающее устройство

**8. Какая логическая операция реализуется с помощью схемы отрицания?**

- А) НЕ
- Б) И
- В) ИЛИ
- Г) ИЛИ – НЕ

**9. Частота переменного тока изменяется:**

- А) при увеличении магнитного поля в обмотке генератора
- Б) при увеличении числа витков обмотки якоря
- В) при изменении числа оборотов ротора
- Г) при изменении числа пар полюсов

**10. Назовите датчики реактивного сопротивления.**

- А) тензометрические
- Б) емкостные
- В) контактные
- Г) термосопротивления

**11. Работа стабилизатора переменного тока зависит от ...**

- А) частоты
- Б) фазы
- В) величины выходного сопротивления
- Г) амплитуды

**12. Как называется минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающей части, чтобы перевести реле из состояния покоя в рабочее состояние?**

- А) мощность срабатывания
- Б) рабочая мощность
- В) мощность управления
- Г) мощность удержания

**13. Как называются запоминающиеся устройства, которые являются неотъемлемой частью цифровой аппаратуры (они выполнялись на основе ферритовых сердечников с прямоугольной петлёй гистерезиса, а в настоящее время выпускаются полупроводниковые)?**

- А) внешние
- Б) внутренние
- В) оперативные
- Г) постоянные

**14. Какие преобразователи проводят преобразование аналогового напряжения в его цифровой эквивалент?**

- А) цифроаналоговые преобразователи ЦАП
- Б) аналого-цифровые преобразователи АЦП
- В) цифровые и аналоговые мультиплексоры АЦП, ЦАП
- Г) цифровые

**15. К какому элементу автоматики относится определение: измерительным органом называется элемент, преобразующий измеряемую величину в величину другого вида, более удобного для воздействия на определённый орган автоматической или телемеханической системы?**

- А) усилитель
- Б) датчик
- В) стабилизатор
- Г) измерительный преобразователь

**16. Амперметр в цепи показывает величину тока:**

- А) мгновенную
- Б) действующую
- В) максимальную
- Г) среднюю

**17. Основой всех интегральных микросхем является ...**

- А) магнитный усилитель
- Б) дифференциальный усилитель
- В) операционный усилитель
- Г) ламповый усилитель

**18. К генераторным датчикам относятся ...**

- А) тахогенераторные и термоэлектрические
- Б) пьезоэлектрические и фотоэлектрические
- В) емкостные
- Г) индуктивные

**19. В каком виде стабилизатора эффект стабилизации напряжения достигается благодаря лавинообразному нарастанию обратного тока в области так называемого пробивного напряжения?**

- А) газовой стабилизации
- Б) феррорезонансной стабилизации
- В) стабилизации постоянного напряжения (полупроводниковые)
- Г) стабилитрон (кремниевый полупроводниковый диод)

**20. Как называется элемент, который под воздействием управляющего сигнала производит определённые переключения в электрических цепях?**

- А) усилитель
- Б) стабилизатор
- В) реле
- Г) датчик

**21. Какие задающие устройства служат для хранения информации, содержание которой не изменяется в ходе работы системы?**

- А) внешние
- Б) внутренние
- В) оперативные
- Г) постоянные

**22. К какому элементу автоматики относится определение: элемент, обеспечивающий постоянство выходной величины при изменении в заданных пределах входной величины?**

- А) усилитель
- Б) датчик
- В) стабилизатор
- Г) переключающее устройство

**23. Сопротивление  $R$  (активное) цепи переменного тока имеет потребитель электрической энергии:**

- А) проводник большой длины
- Б) электромагнит
- В) катушки
- Г) конденсатор

**24. Назовите элемент, преобразующий измеряемую величину в величину другого вида, более удобного для воздействия на определённый орган автоматической системы.**

- А) датчик
- Б) усилитель
- В) стабилизатор
- Г) реле

**25. Как называется мощность, которой управляет реле в процессе переключения**

- А) мощность удержания
- Б) рабочая мощность
- В) мощность управления
- Г) мощность срабатывания

**26. Как называют передачу на расстоянии сигналов о состоянии контролируемого объекта или установки?**

- А) сообщение
- Б) информация
- В) сигнал
- Г) телесигнализация

**27. Как называется функциональное устройство, предназначенное для приёма и запоминания слова, и выполнения над словом некоторых логических преобразований?**

- А) регистр
- Б) триггер
- В) микропроцессор
- Г) мультивибратор

**28. В системе руководящей линией является:**

- А) бит
- Б) разрядность
- В) магистральная структура
- Г) операнды

**29. Диод называется включенным в прямом направлении, когда:**

- А) положительное напряжение приложено к катоду
- Б) электроны вспыскиваются в Р-тип полупроводника
- В) ток течёт в диоде через анод к катоду
- Г) напряжение больше, чем 0,7 В, приложено к диоду

**30. К какому элементу автоматики относится определение: называется элемент, который под воздействием управляющего сигнала производит определённые переключения в электрических цепях?**

- А) усилитель
- Б) датчик
- В) стабилизатор
- Г) переключающее устройство

**31. Чтобы получить резонанс напряжений, к катушке надо последовательно присоединить:**

- А) резистор
- Б) электромагнит
- В) конденсатор
- Г) реле

**32. Для математических операций суммирования, дифференцирования, интегрирования применяется ...**

- А) ламповый усилитель
- Б) магнитный усилитель
- В) дифференциальный усилитель
- Г) операционный усилитель

**33. Назовите датчик, применяемый для измерения механических напряжений.**

- А) тензометрический
- Б) контактный
- В) реостатный
- Г) индуктивный

**34. К какому параметру, характеризующему реле, относится определение: мощность сигнала, при которой происходит отпускание реле ...**

- А) рабочая мощность
- Б) мощность срабатывания
- В) мощность управления
- Г) мощность возврата

**35. Какие элементы используются главным образом для запоминания в течение некоторого интервала времени многоразрядного двоичного кода?**

- А) регистры памяти
- Б) триггер
- В) микропроцессор
- Г) сдвиговые регистры

**36. Количество входов и состояний конечного автомата – это функция:**

- А) нагрузочной способности использования микросхем
- Б) количества требуемых дискретных состояний
- В) требований к устройству
- Г) размера используемой памяти запоминающего устройства

**37. К какому элементу автоматики относится определение:** элемент автоматики и телемеханики, с помощью которого осуществляется преобразование энергии того или иного вида в механическое перемещение, это ...

- А) усилитель
- Б) датчик
- В) стабилизатор
- Г) исполнительный орган

**38. Периодом называется время, в течение которого переменная величина:**

- А) изменит своё направление на противоположное
- Б) совершит полный цикл изменения по величине, направлению и фазе
- В) совершит полный цикл изменения по величине и направлению
- Г) останется без изменения

**39. Как называется элемент, в котором выходная величина имеет такую же физическую природу, как и входная и после преобразования выходная величина всегда больше входной?**

- А) реле
- Б) стабилизатор
- В) усилитель
- Г) датчик

**40. На сколько групп подразделяются указывающие и регистрирующие устройства**

- А) 1
- Б) 2
- В) 3
- Г) 4

**41. Действие каких датчиков основано на изменении величины электрического сопротивления при изменении температуры окружающей среды?**

- А) контактные
- Б) термосопротивления
- В) тензометрические
- Г) реостатные

БГАРФ

**42. Как называются запоминающие устройства, в которых магнитные ленты, магнитные диски, обеспечивают сохранность информации при отсутствии питания, а также практически любую необходимую ёмкость памяти?**

- А) внешние
- Б) внутренние
- В) оперативные
- Г) постоянные

**43. В каком программно-управляемом устройстве обработки цифровой информации, функциональное назначение задаётся с помощью стандартных программ?**

- А) регистр
- Б) триггер
- В) микропроцессор
- Г) мультивибратор

**44. К какому параметру, характеризующему реле, относится определение: минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающей части, чтобы перевести реле из состояния покоя в рабочее состояние, это ...**

- А) рабочая мощность
- Б) мощность срабатывания
- В) мощность управления
- Г) мощность возврата

**45. На индуктивное сопротивление катушки влияет:**

- А) фаза напряжения
- Б) начальная фаза тока
- В) частота тока
- Г) действующее значение тока

**46. Какое преобразование сигнала осуществляется одновременно с усилением входного сигнала?**

- А) постоянный ток преобразуется в переменный
- Б) переменный ток преобразуется в постоянный
- В) постоянный ток преобразуется в переменный, а переменный ток преобразуется в постоянный
- Г) качественное преобразование



**47. Как называется элемент, обеспечивающий постоянство выходной величины при изменении в заданных пределах входной величины?**

- А) стабилизатор
- Б) усилитель
- В) датчик
- Г) реле

**48. D-триггер делит входную частоту:**

- А) в зависимости от значений на его входах
- Б) на 2
- В) на 3
- Г) на 1,5

**49. Если ёмкость увеличить в 4 раза, то частота колебательного контура:**

- А) уменьшится в 6 раз
- Б) увеличится в 2 раза
- В) увеличится в 4 раза
- В) уменьшится в 2 раза

**50. ... входят в состав АПС судна, срабатывают при повышении температуры воздуха в районе их расположения до 70 °С.**

- А) тепловые пожарные извещатели
- Б) дымовые пожарные извещатели
- В) ручные пожарные извещатели
- Г) линейные пожарные извещатели

**Пройти тест:**



## Ссылки на видеоматериалы

### *Глава 1*

#### *Классификация систем управления*



#### *Обзор устройств автоматики*



### *Глава 2*

#### Средства измерения давления (преобразователи давления)



Датчик измерения температуры



Термопары – измерение температуры



Принцип работы многопараметрического преобразователя Rosemount



БГАРФ

Преобразователи ИПВТ-08 для подключения к гигрометрам  
серии ИВГ-1



*Глава 3*

Сельсин



Тахогенератор



БГАРФ

Микроэлектродвигатель



*Глава 4*

Реостаты и их применение



Резистивные датчики влажности



БГАРФ

Резистивные датчики температуры



Индуктивный датчик Принцип работы



Индуктивный датчик



БГАРФ

Преобразователи с трансформаторной развязкой



Как устроен и работает ёмкостный уровнемер



Ёмкостные датчики влажности



БГАРФ

Емкостные бесконтактные выключатели



Цифровой емкостной датчик на микросхеме



Пьезоэлектрические преобразователи



БГАРФ



Термистор, терморезистор, термосопротивление



Терморезисторы



Температурные датчики для защиты  
электродвигателей



БГАРФ

Датчики оптические



*Глава 5*

Электрохимические датчики газа



НПО ПАС: работа мультикритериальной системы  
обнаружения пожара



БИАРФ

Учебный фильм: судовые системы пожаротушения,  
огнетушители



### *Глава 6*

Мультиплексоры и демультиплексоры



Демультиплексоры, принцип действия



БГАУФ

Комбинационные устройства:  
дешифраторы и шифраторы



Шифраторы, дешифраторы.  
Назначение, принцип работы, типовые схемы



Преобразователи кодов, принцип действия



БГАРФ

ОСНОВЫ АЦП и ЦАП



Цифровой компаратор



Цифровые компараторы



БГАРФ

Сумматоры, принцип действия



Полусумматор и сумматор



Триггеры, регистры, счетчики: лекция Яковлева О.Р.



БГАРФ

## Глава 7

Начинающим: операционные усилители



Операционный усилитель



Классы усилителей мощности



БГАРФ

Как работает транзистор



*Глава 8*

Как работает реле



Электромагнитное реле



БГАРФ



## Контактор принцип работы и схема подключения



### Принцип работы модульного контактора



### Устройство и принцип работы магнитного пускателя (контактора)



БГАРФ

Видеокурс VE703: автоматические выключатели  
для защиты электродвигателей серии MS



*Глава 9*

Что такое электромагнитное реле,  
основные параметры электромагнитных реле



Реле



Поляризованное реле



Как работают поляризованные реле РП-3, РП-4, РП-5, РП-7.  
Описание конструкции



Подключение реле управления нагрузкой:  
схема, устройство, принцип работы



БИАРФ

Дугогасительная камера



Простая конструкция реле времени на транзисторах



Тепловое реле, видеоурок



БГАРФ

Устройство теплового реле



*Глава 10*

Релейное исполнительное устройство



Электромагнит. Учебный фильм



БГАРФ

## Глава 11

Электродвигатель постоянного тока, принцип работы



Устройство и принцип работы двигателя постоянного тока



Работа асинхронного двигателя



БГАУФ

Асинхронный двигатель, принцип работы и строение,  
простыми словами



## *Глава 12*

Принцип работы шагового двигателя



Управление шаговым двигателям (биполярный)



## Принцип работы шагового привода и шаговых двигателей



БГАРФ



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойленко А.Ю. Электронные и микропроцессорные средства судовых систем управления: учеб. пособие. – Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2014.
2. Молочков В.Я. Микропроцессорные системы управления техническими средствами рыбопромысловых судов: учеб. пособие. – М.: МОР-КНИГА, 2013.
3. Белоусов В.В., Волкогон В.А. Судовая электроника и электроавтоматика: учеб. пособие. – М.: Колос, 2008.
4. Алексеев Н.А., Макаров С.Б., Портнягин Н.Н. Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими установками промышленных судов: учеб. пособие. – М.: Колос, 2008.
5. Нарышкин А.К. Цифровые устройства и микропроцессоры: учеб. пособие. – М.: Академия, 2008.
6. Алексеев Н.А. Жадобин Н.Е. Микропроцессорные системы контроля и управления судовых технических средств. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2005.
7. Тырва В.О. Электрические и электронные аппараты электроприводов и систем автоматики: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015.
8. Бруслиновский Б.В., Катханов М.Н. Функциональные устройства судовых автоматизированных систем: учеб. пособие. – Л.: Судостроение, 1991.
9. Шандров Б.В., Чудаков А.Д. Технические средства автоматизации: учебник. – М.: Академия, 2010.
10. Пипченко А.Н., Пономаренко В.В., Шевченко В.А. Принципы построения и основы наладки контроллеров и систем автоматики: учебное пособие. – Одесса: ТЭС, 2010.
11. Кузнецов С.Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации: учебник. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015.
12. Ейденос А.И. Эксплуатация судовых компьютерных систем управления: учеб. пособие. – Калининград: БГАРФ, 2007.
13. Ейденос А.И. Эксплуатация судовых систем и устройств управления: конспект лекций. – Калининград: БГАРФ, 2005.

БГАРФ



**Кирилл Андреевич Новоселов**

**ЭЛЕМЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА  
СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие  
для курсантов специальности 26.05.07  
«Эксплуатация электрооборудования  
и автоматики судов»

---

*Ведущий редактор: О.В. Напалкова*

*Лицензия № 021350 от 28.06.99.*

*Младший редактор Г.В. Деркач*

*Печать офсетная.*

*Компьютерное редактирование  
О.В. Савина*

*Формат 70x100/16.*

*Подписано в печать 16.11.2020 г.  
Усл. печ. л. 17,9. Уч.-изд. л. 16,1.*

*Заказ № 1603. Тираж 60 экз.*

Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:  
<http://lib.bgarf.ru/>

**БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»**

*Издательство БГАРФ,  
член Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений  
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6.*

