

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**Факультет «Автоматизация, мехатроники и управления»  
Кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств»**

### **Конспект лекций**

**Задание к контрольной работе по дисциплине**

**«Средства автоматизации и управления»**

**Ростов-на-Дону**

**2022**

**УДК 62-192**

**Составитель: Самосудов А.П., Губанова А.А.,**

**Средства автоматизации и управления. Конспект лекций. –  
Ростов-на-Дону: Донской государственный технический  
университет, 2022. – 70 с.**

Конспект лекций для выполнения контрольной работы по дисциплине «Средства автоматизации и управления» предназначены для студентов заочной формы обучения по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» профиль «Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении»

УДК 62-192

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Донской государственный технический университет

## **Конспект лекций**

### **по дисциплине «Средства автоматизации и управления»**

#### **Общие сведения об элементах и устройствах автоматики**

За последние годы значительно выросли требования к техническому уровню и качеству средств и систем автоматики. При управлении сложными производственными процессами в промышленности и других отраслях широко используют элементы и системы электро-, гидро-, пневмоавтоматики, а также комбинированные системы, в процессе функционирования которых качественно и количественно преобразуются сигналы входа и выхода различных средств и систем автоматики.

**Система электроавтоматики** представляет собой сложное техническое устройство, состоящее из совокупности соединенных определенным образом элементов радиоэлектронной аппаратуры, кабелей, электромеханизмов. При проектировании системы **электроавтоматики** конструкторские подразделения специализируются по следующим направлениям: по разработке функциональных и принципиальных схем, по пультовой аппаратуре, по кабельной сети, по применению комплектующих элементов.

Элементы и системы электроавтоматики разнообразны и отличаются по физической природе, принципам действия, схемам, конструкциям и прочее.

**Элемент** – это простейшая, конструктивно-целостная ячейка, выполняющая одну определённую операцию с сигналом (преобразование, сравнение, хранение, коррекцию, распределение, управление).

**Система автоматики** – это совокупность объекта управления и электрического автоматического управляющего устройства, взаимодействующих между собой.

Важными разновидностями электроавтоматики является автоматический электропривод, электромагнитные и электронные устройства автоматики.

Системы и устройства электроавтоматики выполняют задачи: контроль, сигнализация, блокировка, защита, автоматическое управление.

**Устройства автоматического контроля** определяют годность продукции и правильность протекания технологического процесса, обеспечение надёжности и безаварийной работы оборудования и др.

**Устройства сигнализации** преобразуют сигналы, используемые в системах автоматики, в сигналы, воспринимаемые человеком (гудок, звонок, сирена, лампа), часто эти системы включают автоматическую запись информации.

**Устройства блокировки и защиты** предотвращают неправильный порядок работы средств эл. автоматики или технологического процесса и обеспечивают отключение соответствующего оборудования при ненормальных (не штатных) режимах (предохранители, авт. выключатели – при перезагрузке, перегрев подшипника).

Система электроавтоматики функционирует по команде обслуживающего персонала по заданной программе или автоматики в зависимости от значения каких-либо параметров, определяющих желаемый ход процесса в объекте управления.

(контроль за ходом процесса управления; организация пуска, торможение, переход с одной ступени скорости на другую, реверс различного технологического оборудования в определённой последовательности во времени или по командам технологического оборудования; автоматическое регулирование и управление технологическим оборудованием по заданным технико-экономическим критериям)

Различают системы электроавтоматики с разомкнутой и замкнутой цепью воздействия.

**Цепь воздействия** – совокупность частей системы, по которым передаются управляющие воздействия.

Системы автоматики имеют конструктивную, функциональную и алгоритмическую структуры.

**Конструктивная структура** – это структура системы автоматики, каждая часть из которой представляет собой самостоятельное устройство; эти структуры определяют принципиальные схемы систем автоматики, показывающие взаимодействие отдельных элементов системы.

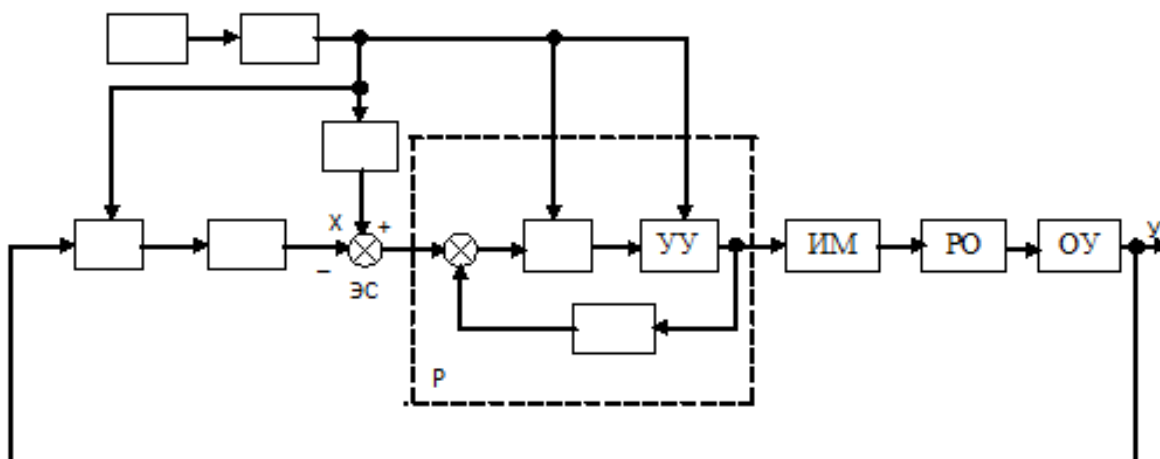
**Функциональная структура** – это структура, каждая часть которой предназначена для выполнения определённой функции, например, получение и преобразование информации, передача и сравнение сигналов, формирование управляющих воздействий.

**Алгоритмическая структура** – это структура, в которой каждая часть предназначена для выполнения определённого алгоритма преобразования информации.

Структуру системы автоматики с той или иной степенью детализации обычно представляют графически в виде структурной схемы.

Структурные схемы обычно включают в себя основную (прямую) цепь воздействий, идущую от входа к выходу системы, которая определяется в соответствии с основным назначением системы, и цепь главной ОС, а также часто внутренних ОС, служащих для улучшения процессов управления.

#### Обобщённая структура системы эл. автоматики:



**ОУ** – объект управления

**Д** – датчик (для преобразования измеряемого параметра ОУ в сигнал вида и величины, необходимых для работы измерительных устройств и регуляторов)

**НП** – нормирующий преобразователь (обеспечивает работу датчиков различного типа на нормализованный вход системы эл. автоматики:  $0 \div 5$ ;  $0 \div 25$  мА постоянного тока и  $1,5 \div 2,5$ ;  $4 \div 8$  кГц переменного тока)

**ЗУ** – задающее устройство (вводит в систему эл. автоматики эталонное значение "X" регулируемой величины ОУ; ЗУ может быть программным, тогда оно последовательно выдаёт различные значения эталона).

**ЭС** – элемент сравнения (сравнивает эталонную величину от ЗУ, и величину, получаемую измерительного устройства Д, НП. При наличии рассогласования создаётся регулируемое воздействие на систему, которое стремится свести к минимуму это рассогласование).

**Р** – регулятор (совокупность усилителя "У", управляющего "УУ" и корректирующего "КУ" устройств. Выполняет коммутацию и алгебраическое суммирование сигналов измерительного и задающего устройств, выработку требуемого закона управления).

**ИМ** – исполнительный механизм (элемент, получающий управляющее воздействие от регулятора и преобразующий его в силовое воздействие на регулируемый орган).

**РО** – регулирующий орган (перемещается исполнительным механизмом "ИМ" и непосредственно изменяет регулируемую величину).

**ИП** – источник питания.

**СТ** – стабилизатор.

При управлении сложными производственными процессами часто применяют микропроцессоры и регуляторы, в которых сигналы представляются в цифровой форме. В таких системах в качестве входных устройств используют АЦП, в качестве выходных – ЦАП (либо, например, шаговые двигатели.).

Все технические средства автоматики можно представить в виде иерархической 3-х уровневой структуры:

1. **Высший уровень** – системы управления и системы автоматического регулирования.
2. **Средний уровень** – автоматические регуляторы, следящие приводы, другие подсистемы, входящие в состав систем управления и регулирования.
3. **Нижний уровень** – элементы и устройства подсистем, регуляторов, приводов систем. Технические средства этого уровня представляют собой элементную базу автоматики.

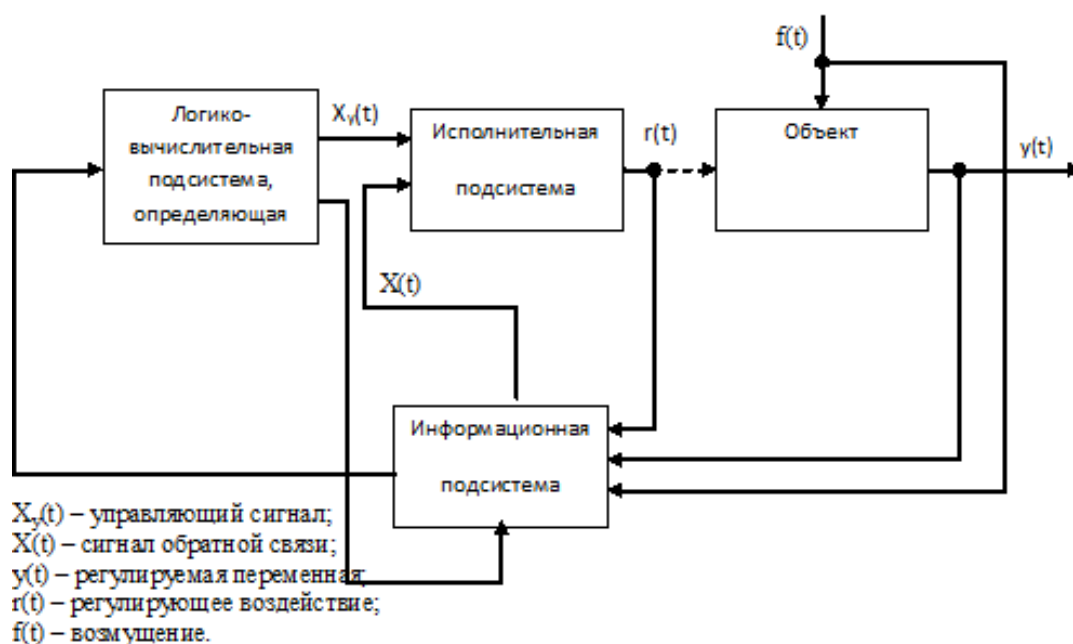
Общей функциональной частью САУ и САР является объект управления (регулирования).

**Объектом управления** называют управляемую часть системы, т.е. агрегат, машину, установку, требуемый режим функционирования которых должен поддерживаться управляющей частью системы в соответствии с выбранной или заданной целью управления.

**Система управления (СУ)** – замкнутый динамический комплекс, состоящий из управляемых объектов и трёх подсистем:

- информационная;
- логико – вычислительная;
- исполнительная.

#### Обобщённая схема одномерной СУ:



Совокупность технических средств, предназначенных для получения, передачи и представления информации, называют **информационной подсистемой**.

К средствам, предназначенным для получения и преобразования первичной информации о внешних и внутренних факторах работы управляемых объектов, относятся следующие элементы СУ: датчики первичной информации, преобразователи, вычислительные устройства для первичной обработки информации и др., а также средства для передачи и представления информации в форме, удобной для управления – передатчики, каналы связи, кодирующие и декодирующие устройства, преобразователи информации, приемники и т.д.

Совокупность технических средств, предназначенных для обработки информации, называют **логико–вычислительной подсистемой**. Основная функция средств обработки информации состоит в выработке решений, необходимых для достижения цели управления на основе имеющейся информации. Эти решения обычно реализуются в форме управляющих или задающих сигналов.

Технические средства для формирования управляющих воздействий, осуществляющие непосредственное управление объектами в соответствии с целью управления, образуют **исполнительную подсистему** (регуляторы, следящие системы, авт. приводы, сервомеханизмы регуляторов).

### Датчики

Для непрерывного контроля за протеканием технологических процессов, режимом работы различных машин и аппаратов используют элементы – датчики.

**Датчики** – это устройство, реагирующее на изменение параметров процесса, режима работы машины и аппаратов и осуществляющее непрерывное преобразование измеряемой физической величины в другую, удобную для использования в последующих элементах систем автоматики.

Датчики можно классифицировать:

1. **По виду входной величины:**
  - a. датчики преобразования технологической неэлектрической величины в электрическую (датчики давления, уровня, температуры, линейного перемещения, угла поворота и т.д.)
  - b. датчики преобразования одной электрической величины в другую (датчики тока, напряжения, фазочувствительные схемы).
2. **По виду преобразования:**
  - a. аналоговые (потенциальные, токовые, частотные, фазовые)
  - b. дискретные (амплитудно-импульсные, времяимпульсные, числоимпульсные и др.).
3. **По характеру преобразования входной величины в выходную:**
  - a. параметрические;
  - b. генераторные;
  - c. компенсационные;
  - d. частотные.

**Параметрические датчики** – в них изменение входной неэлектрической величины преобразуется в изменение какого-либо электрического параметра выходной цепи (активного сопротивления, индуктивности, емкости). Они требуют дополнительного источника энергии.

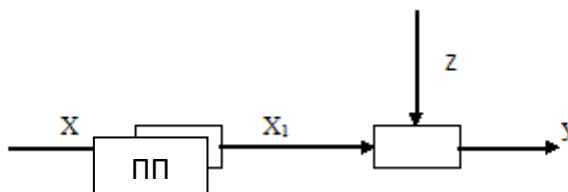
**Генераторные датчики** – в них входная величина преобразуется в ЭДС на выходе (датчики термо-ЭДС, пьезоэлектрические, фотоэлектрические, тахометрические и др.). они не требуют дополнительного источника энергии.

**Компенсационные датчики** – в них входная величина (часто после предварительного преобразования) компенсируется другой величиной, имеющей ту же физическую природу. Для непрерывной компенсации осуществляется отрицательная ОС.

**Частотные датчики** – в них различные физические величины на входе (перемещение, скорость, расход) изменяют частоту переменного тока или частоту следования импульсов.

Датчики также классифицируют по конструкционному исполнению, по величине погрешности, по другим признакам.

В общем случае датчик, являющийся преобразователем информации, состоит из первичного преобразователя "ПП", преобразующего контролируемую величину  $X$  в величину, удобную для измерений  $X_1$ , и преобразователя "П", в котором величина  $X_1$  преобразуется в электрический сигнал  $y$  за счет подводимой энергии  $Z$ .



Иногда датчики имеют более простую структуру:



Технические характеристики элементов, устройств и систем автоматики (САР и САУ) классифицируют на 5 групп: статические, динамические, точностные, эксплуатационные и экономические.

1. **Статические характеристики:** коэффициенты усиления и передаточные коэффициенты (чувствительность); линейность статических характеристик (для линейных элементов и устройств); значения входных и выходных параметров (порог чувствительности, зона нечувствительности или неоднозначности, значения параметров насыщения, рабочий диапазон изменения сигналов и параметров); входная и выходная мощность; номинальные значения параметров и т.д.
2. **Динамические характеристики:** степень астатизма; частотные характеристики (передаточные функции): полоса пропускания; показатели качества, характеризующие переходные режимы (постоянные времени, величины демпфирования, перерегулирования); запасы устойчивости по фазе и амплитуде и др.
3. **Точностные характеристики:** статическая точность (или позиционная, скоростная и др. ошибки); точность в переходных режимах (быстродействие, точность при типовых воздействиях); точность при наличии возмущений; статическая точность (динамическая ошибка).
4. **Эксплуатационные характеристики:** эффективность применения согласно выбранным критериям; стабильность характеристик и параметров в условиях нормальной (штатной) эксплуатации; устойчивость к возмущениям внешней

среды (термостойкость, влагостойкость, вибропрочность и т.п.), масса, габаритные размеры и др.

5. **Экономические характеристики:** надёжность; стоимость; КПД; ресурс работы и т.д.

Задача разработки САР состоит в том, чтобы, располагая некоторыми априорными сведениями об объекте (процессе) и техническим заданием (ТЗ) на систему в целом (по точности, коэффициентам передачи, мощности, надёжности и т.д.), выбрать технические средства из числа серийных, (а в случае необходимости сформулировать ТУ на разработку новых) и составить схему системы, обеспечивающую реализацию данного ТЗ.

При выборе устройств, входящих в САР, они должны рассматриваться во взаимодействии друг с другом, т.е. должны быть совместимыми.

Особое место среди элементов и устройств САР занимают датчики первичной информации, измерительные и преобразующие устройства, от статической и динамической точности которых непосредственно зависит точность системы в целом.

Основными характеристиками датчиков систем эл. автоматики являются:

- статическая характеристика  $y=\varphi(x)$ , т.е. зависимость выходной величины от входной в установившемся режиме Ж
- чувствительность  $S=\Delta y/\Delta x$ , т.е. отношение приращения выходной  $\Delta y$  к входной  $\Delta x$  величин;
- погрешность;
- динамические характеристики, определяющие поведение датчиков при различных изменениях входной величины.

Большинство датчиков по характеру динамических свойств можно отнести к безынерционным и апериодическим звеньям первого и более высоких порядков. К датчикам, применяемым в системах электроавтоматики, предъявляются следующие требования:

- необходимый диапазон изменения входных и выходных сигналов;
- линейность статических характеристик;
- высокая чувствительность;
- малые инерционность и погрешность;
- достаточная мощность выходного сигнала;
- наименьшее влияние датчика на измеряемый параметр;
- надёжность в работе;
- малые габаритные размеры и масса.

### **Параметрические преобразователи (датчики)**

Любой датчик содержит чувствительный элемент или преобразователь, который реагирует на изменение входной величины и преобразует ее в соответствующий сигнал, удобный для дальнейшего использования.

Таким образом, многие преобразователи можно отнести к простейшим датчикам, т.е. датчикам с непосредственным преобразованием. Однако часто выходной сигнал таких элементов требует дополнительных преобразований – в этом случае используются датчики с промежуточным преобразованием.

Параметрические преобразователи (чувствительные элементы) обычно преобразуют неэлектрические входные величины в параметры электрических цепей: R L C и M и подразделяются на:

- резисторные;
- индуктивные;



- емкостные;
- трансформаторные.

Эти элементы требуют дополнительных источников питания.

Параметрические преобразователи используются, главным образом, для преобразования перемещений (линейных и угловых), давлений, механических напряжений, температур в величины электрического напряжения, тока, частоты и др.

### Резисторные преобразователи

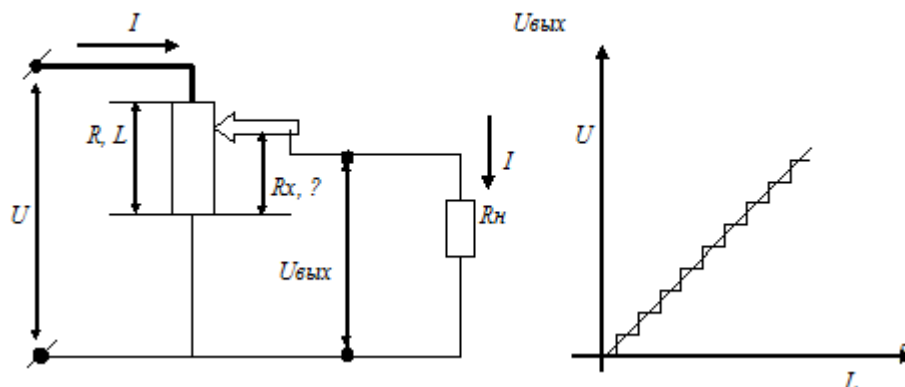
Принцип действия резисторных преобразователей (чувствительных элементов) основан на изменении электрического сопротивления  $R$  при изменении длины  $\ell$ , сечения  $S$  или удельного сопротивления  $\rho$  резистора, так как в общем случае:  $R = \ell \cdot \rho / S$ . Кроме этого, также используют зависимость  $R$  от контактного давления и освещенности.

Таким образом, резисторные преобразователи подразделяются на:

- потенциометрические;
- тензорезисторы;
- терморезисторы;
- угольные;
- фоторезисторы.

### Потенциометрические преобразователи

Потенциометрические преобразователи служат для преобразования угловых или линейных механических перемещений в соответствующие изменения сопротивления (напряжения или тока). Наиболее часто используют проволочный потенциометрический датчик непрерывной намотки (каркас, на который однослойная обмотка изолированного провода с высоким удельным сопротивлением и подведен контакт).



По конструктивному исполнению каркаса: плоские и цилиндрические с прямолинейным перемещением подвижного контакта, кольцевые, спиральные.

У одноконтурного ПД (потенциометрического датчика) с прямолинейным перемещением подвижного контакта (смотри рисунок) входной величиной является перемещение  $\ell$  подвижного контакта, а выходной – напряжение  $U_{\text{вых}}$  на сопротивлении нагрузки  $R_n$ .

Зависимость  $U_{\text{вых}} = f(\ell)$  является статической характеристикой ПД.

На холостом ходу  $U_{\text{вых}} = I \cdot R_x = (U/R) \cdot R_x$ , где  $I$  – ток в цепи потенциометра,  $R$  – общее сопротивление потенциометра.

Для ПД с цилиндрическим каркасом и равномерной намоткой проводом одного сечения:

$$U_{\text{вых}} = U \cdot R_x / R = U \cdot \ell / L = S_u \cdot \ell,$$

где  $S_u = U/L$  – чувствительность датчика по напряжению,  $L$  – полная длина потенциометра.

В многовитковых чувствительных ПД необходимо учитывать ступенчатость изменения напряжения при перемещении контакта с витка на виток. Ступенчатая, т.е. реальная зависимость  $U_{\text{вых}} = \varphi(\ell)$  для датчиков представляет собой ступенчатую характеристику.

Абсолютная витковая погрешность  $\Delta R_w = R/2 \cdot w$ .

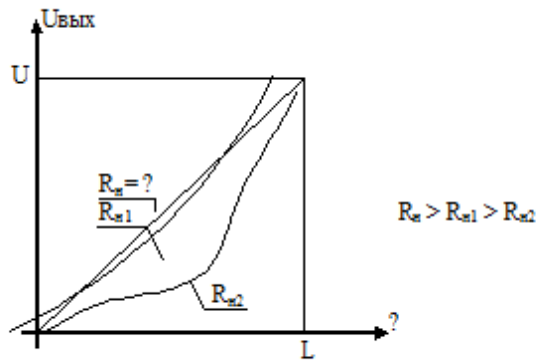
Относительная погрешность  $\delta_w = \pm \Delta R_w / R = \pm 1/2 \cdot w$

где  $R_w$  – сопротивление одного витка;  $R$  – общее сопротивление потенциометра;  $w$  – число витков.

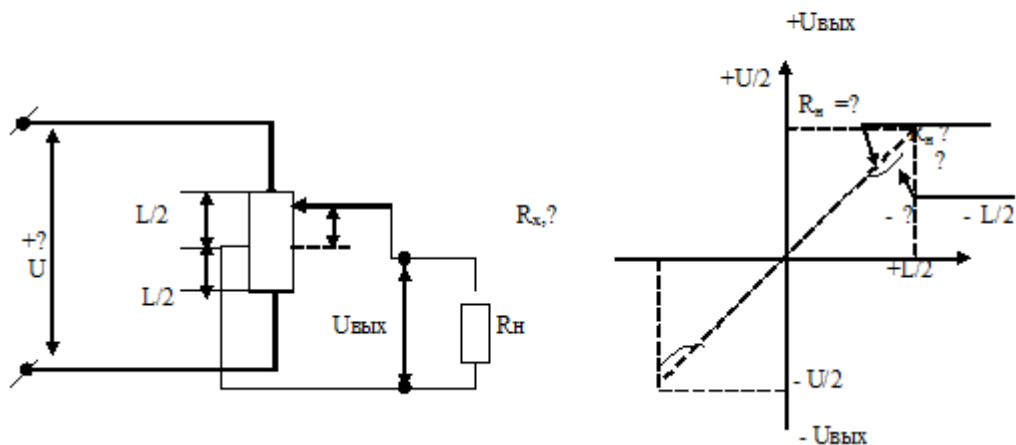
При подключении к ПД нагрузки  $R_n$  статическую характеристику можно представить (использован метод эквивалентного генератора):

$$U_{\text{вых}} = U(\ell/L) \cdot \alpha / \{ \alpha + [ \ell/L - (\ell/L)^2 ] \},$$

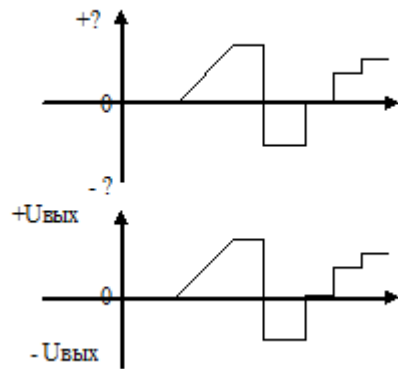
то есть при подключении нагрузки статическая характеристика  $U = \varphi(\ell)$  нелинейна. Для уменьшения нелинейности  $R_n \gg R$  (т.е.  $\alpha = (R_n/R) > 10 \div 100$ )



В случаях, когда необходимо, чтобы датчик реагировал на знак входного перемещения, используют двухщеточные мостовые двухтактные ПД, а также реверсивные или двухтактные ПД с выводом средней точки.



При перемещении движка относительно средней точки (изменение знака перемещения) изменится и знак напряжения на выходе:



У двухтактных датчиков, питаемых переменным током, изменение знака входного перемещения приводит к изменению **фазы** выходного напряжения на  $180^\circ$ .

Часто требуется, чтобы при перемещении движка выходное напряжение изменялось по определенной **нелинейной** функции. В этих случаях используют профильные, ступенчатые, синусо-косинусные и другие потенциометры.

Потенциометрический датчик как звено автоматической системы регулирования рассматривается вместе с сопротивлением нагрузки. При активной нагрузке ПД является безынерционным звеном, т.к. его индуктивность весьма мала и ею можно пренебречь до частот в десятки кГц.

При активно-реактивной нагрузке начинает проявляться инерционность устройства и тип звена зависит от характера нагрузки.

**Достоинства ПД:** простота конструкции, относительно малые габариты и масса, достаточная мощность, работа на постоянном и переменном токе.

**Недостатки ПД:** наличие скользящего контакта (снижение надежности, усилие), ступенчатость статических характеристик и их нелинейность при больших нагрузках (по току и мощности).

## Тензорезисторы

Тензорезисторы являются разновидностью резисторных преобразователей и используют тензоэффект – изменение величины активного сопротивления проводниковых или полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений.

Тензоэффект при деформации растяжения или сжатия характеризуется коэффициентом чувствительности:

- $S_t = \delta R / \delta \ell = E \cdot (\delta R / \sigma)$ ;
- $\delta R = \Delta R / R$ ;
- $\delta \ell = \Delta \ell / \ell$ ;

где  $\Delta R$  – приращение сопротивления при изменении длины  $\ell$  на величину  $\Delta \ell$ ,

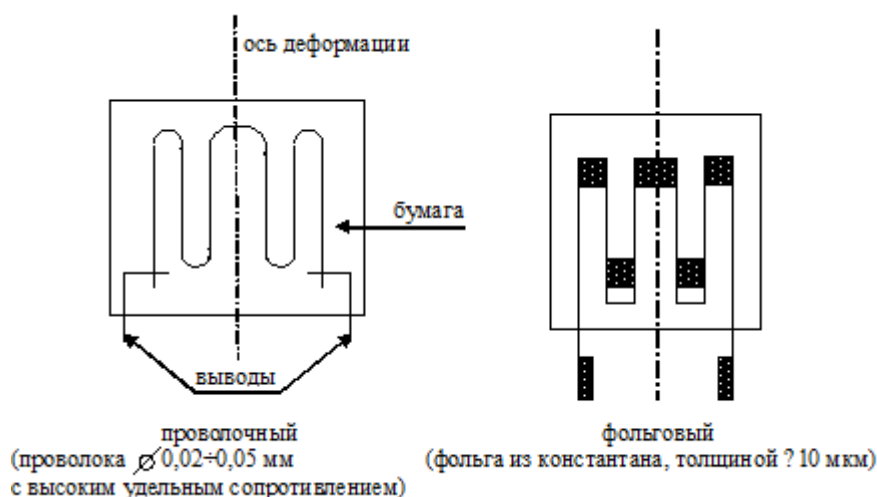
$E$  – модуль упругости материала,

$\sigma$  – механическое напряжение.

Коэффициент чувствительности показывает, во сколько раз относительное изменение сопротивления  $\delta R$  больше его относительной деформации  $\delta \ell$ .

Коэффициент тензочувствительности для используемых в тензорезисторах металлов  $S_t \approx 2$  (константан, нихром, хромель); для полупроводниковых металлов  $S_t \approx 100$  (германий, кремний), однако у них низкая механическая прочность.

### Схемы тензорезисторов:



Тензорезистор наклеивают на поверхность испытуемой детали так, чтобы его продольная ось была расположена в направлении измеряемой деформации детали.

Характеристика управления проволочных тензорезисторов в пределах упругой деформации близка к линейной (достигает 0,1%) и определяется выражением:

$$\Delta R = R \cdot S_T \cdot \delta \ell = (\rho \cdot S_T / S) \cdot \Delta \ell$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения

Погрешности проволочных тензорезисторов зависят от температуры, сопротивления изоляции, влагостойкости, качества наклеивания и наличия поперечной деформации. Проволочные тензорезисторы выполняются с сопротивлением 10÷100 Ом и имеют размеры основания 2÷100 мм. **Достоинства:** малый вес и размеры, малая инерционность, отсутствие гистерезиса. **Недостатки:** относительно невысокая чувствительность. (Фольговые – аналогично, но могут пропускать большие токи (у проволочных – несколько десятков мА) и благодаря рисунку решетки меньше реагируют на поперечные деформации).

### Терморезисторы

Терморезисторы являются разновидностью резисторных преобразователей и основаны на изменении электрического сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при изменении их температуры.

Для металлов зависимость электрического сопротивления от температуры имеет вид:

$$R(\theta) = R_0 (1 + \theta \cdot \alpha)$$

Для изготовления чувствительного элемента используют: медь, платину, никель, а также полупроводниковые материалы: окислы марганца, меди, железа, никеля, кобальта и др., которые стекают при высоких температурах.

Терморезисторы из медного проводника применяются в диапазоне температур от  $-50^\circ$  до  $+150^\circ\text{C}$  ( $\alpha = 4,27 \cdot 10^{-3} \text{ град.}^{-1}$ ), из платиновой проволоки от  $-190^\circ$  до  $+650^\circ\text{C}$  ( $\alpha = 3,96 \cdot 10^{-3} \text{ град.}^{-1}$ ), из стали и никеля от  $100^\circ$  до  $150^\circ\text{C}$ .

Терморезисторы выпускают от 10 до 100 Ом.

Характеристика управления проволочных медных терморезисторов практически линейна во всем рабочем диапазоне, у платиновых – нелинейна. Чувствительность:

- медных  $S = R_0 \cdot \alpha$
- платиновых  $S = R_0 \cdot (\alpha + 2 \cdot \beta \cdot \theta)$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты.

Чувствительность медных – постоянна, а платиновых – изменяется с изменением температуры.

По динамическим свойствам терморезисторы относятся к апериодическим звеньям, описываемым дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_r(t)$$

$$\text{передаточная функция } K(p) = \frac{K}{T_p + 1}$$

$K$  – передаточный коэффициент звена,  $T$  – постоянная времени.

Постоянные времени терморезисторов существенно зависят от его конструкции и составляют от долей секунд до десятков минут.

Погрешность измерений проволочных терморезисторов составляет  $\leq 0,5 \div 1\%$ .

Терморезисторы обычно используют непосредственно для контроля температур, но можно (при пропускании через них достаточно большого тока и их перегрева в результате этого и используются условия теплоотдачи) и для контроля скорости движения контролируемой среды относительно терморезистора, плотность среды (газ).

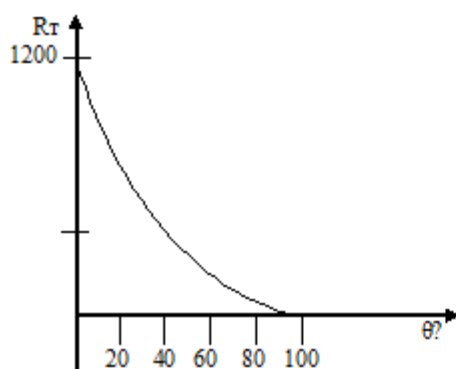
Терморезисторы из полупроводниковых материалов называют **термисторами**. Их особенность – отрицательный ТКС, т.е. сопротивление изменяется с повышением температуры (по экспоненциальному закону):

$$R_r = R_0 e^{-\alpha \theta} = R_0 \left( 1 - \alpha \theta + \frac{\alpha^2 \theta^2}{2} + \dots \right)$$

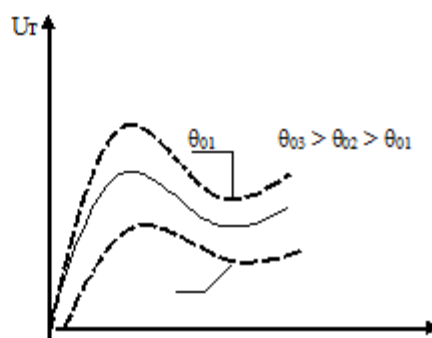
где  $R_0$  – сопротивление термистора при начальной температуре.

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления термистора ( $\alpha = 0,03 \div 0,06 \text{ град}^{-1}$ ).

$\theta$  – перегрев относительно начальной температуры.



температурная характеристика



вольт-амперная характеристика

Конструктивно термисторы представляют собой тело дисковой, шариковой, цилиндрической и др. форм с металлическими выводами, корпус покрыт слоем лака или стекла, иногда корпус металлический или стеклянный.

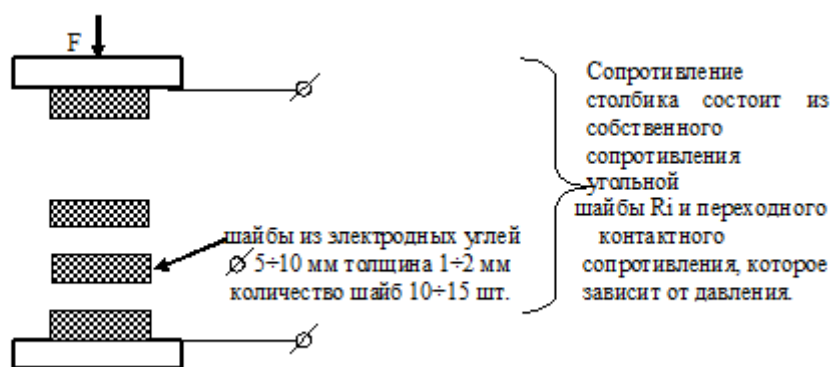
Чувствительность термисторов в  $5 \div 30$  раз выше, чем терморезисторов.

Номиналы: от десятков Ом до сотен кОм.

Нелинейность характеристик термисторов обуславливает их использование при измерении температур в достаточно узких пределах или при совместной работе с дополнительными устройствами, линеаризующими характеристики. Термисторы имеют большой разброс по сопротивлению  $\pm 20\%$  от номинального значения, что затрудняет взаимозаменяемость. (ММТ – медно-марганцевые, КТМ – кобальто-марганцевые, ТКП – косвенного подогрева). В качестве термисторов возможно использование германиевых диодов и транзисторов, обратное сопротивление которых является зависимым от температуры.

### Угольные преобразователи

Угольные преобразователи являются разновидностью резисторных преобразователей, их действие основано на изменении контактного сопротивления между частицами угля при изменении давления. Угольные преобразователи применяются для измерения усилий, малых перемещений. Конструктивно выполняются в виде угольных столбиков и тензолитовые.



В первом приближении

$$R = \frac{1}{kp} + R_i$$

где  $p$  – давление, Па;

$K$  – постоянный коэффициент,  $\text{м}^2/\text{Н} \cdot \text{Ом}$ .

Характеристика управления  $R=f(p)$  нелинейна, вследствие чего его чувствительность переменна. Поэтому обычно работают на небольшом участке, в пределах которого характеристика почти линейна и чувствительность изменяется незначительно. Характеристика управления обычно обладает гистерезисом (т.е.  $R=f(p)$  при увеличении и изменении " $p$ " не совпадает  $\sim 1 \div 2\%$ ).

Другие недостатки: нестабильность их работы, зависимость характеристик от температуры и влажности окружающей среды.

Тензолитовые преобразователи выполняют в виде углеродистых полосок, состоящих из смеси графита, сажи, бакелитового лака и др. Имеют малые габариты и массу, применяются для измерения быстроменяющихся и ударных напряжений в движущихся деталях малого размера.

Работают как на сжатие, так и на растяжение.

Чувствительность выше, чем у проводниковых тензорезисторов и составляет  $S_T = 15 \div 20$ .

**Недостатки:** разовые (отрыв от детали разрушает их), невысокая стабильность и точность.

### Фотоэлектрические преобразователи

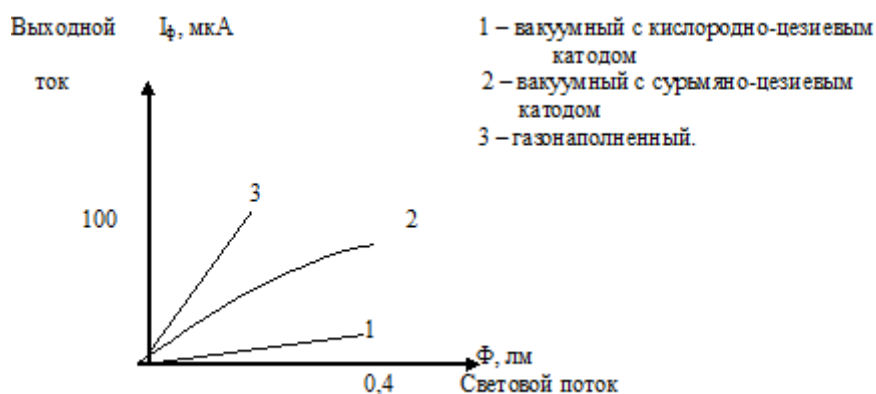
Фотоэлектрические преобразователи являются разновидностью фоторезисторов и используют внешний либо внутренний фотоэффект.

**Внешний фотоэффект** – испускание электронов фоточувствительным материалом при освещении во внешнее пространство.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом – вакуумный или газонаполненный стеклянный баллон, на внутреннюю стенку которого нанесен фоточувствительный слой (катод).

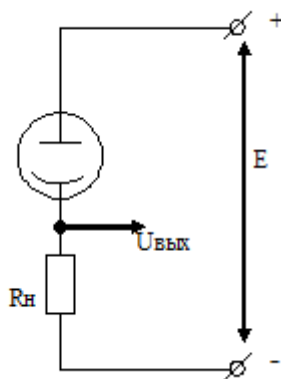
Разновидностью являются фотоумножители, имеют более высокую чувствительность за счет вторичной эмиссии.

Основные характеристики: световая, спектральная, вольтамперная, частотная и параметр – интегральная чувствительность.



Газонаполненные имеют более высокую чувствительность, но более инерционны, нестабильность характеристик и др. Частотная характеристика определяет зависимость фототока  $I_f$  от частоты  $f_m$  модуляции светового потока и позволяет оценивать инерционность фотоэлементов. Вакуумные фотоэлементы практически безынерционны. У газонаполненных  $I_f$  уменьшается при  $f_m \geq 2$  кГц. Интегральная чувствительность  $S_{\text{и}} = dI_f/d\Phi \leq 100$  мкА/лм.

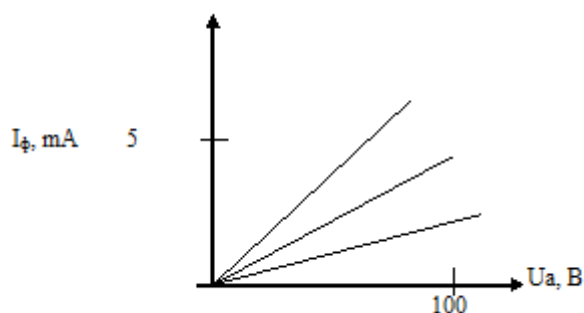
### Схема включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом:



**Внутренний фотоэффект** заключается в перераспределении электронов в веществе при поглощении им света (меняется электропроводимость вещества).

Конструктивно фоторезистор представляет собой основание-изолятор, на который наносится слой полупроводникового вещества.

Вольтамперные характеристики фоторезистора при различных величинах светового потока имеют вид:



Частотная характеристика определяет зависимость выходного сопротивления фоторезистора от частоты  $f_m$  модуляции светового потока.  $f_m$  обычно  $10 \text{ Гц} \div \leq 2 \text{ кГц}$ .

Интегральная чувствительность (обычно у фоторезисторов называют удельной чувствительностью) – чувствительность мкА/лм отнесенная к 1 В приложенного напряжения

$$500 \text{ мкА/В} \cdot \text{лм} \div \leq 6000 \text{ мкА/В} \cdot \text{лм}$$

К параметрическим фотоэлементам относят фотодиоды и фоторезисторы, принцип действия которых основан на вентильном фотоэффекте. Чувствительность: фотодиоды до 29 мА/лм, фототранзисторы до 1 А/лм.

Фотоэлектрические преобразователи используют для измерения оптических параметров: яркости света, спектрального состава, оптической плотности сред, отражения световых волн от поверхностей и т.п. Используют и для измерения температуры (яркость, спектр) – фотоэлектрические параметры.

### Схемы фотореле на фоторезисторе и фотодиоде:

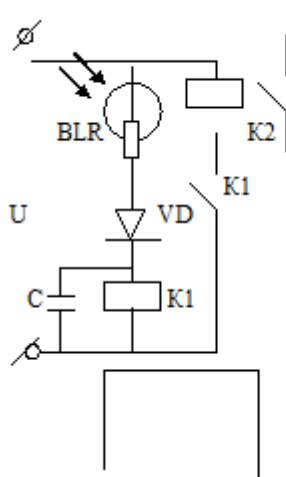
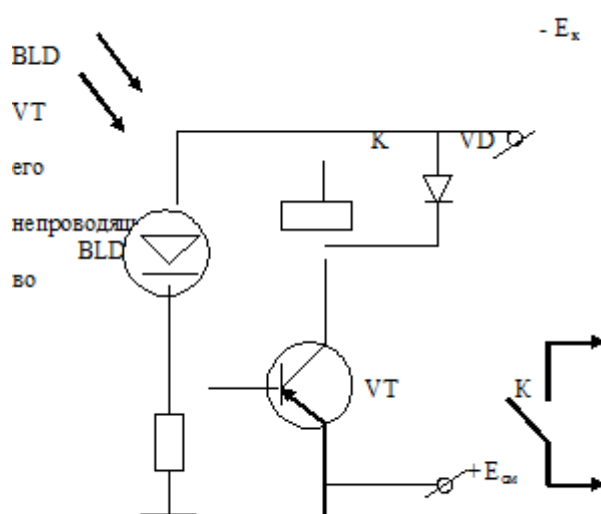
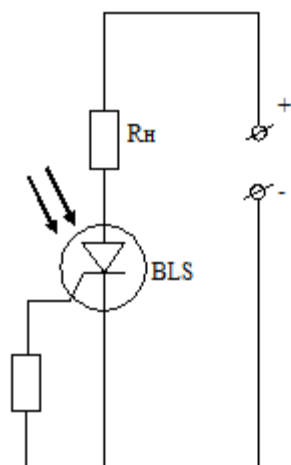


Схема срабатывает при освещении BLR. При освещении сопротивление уменьшается в  $10 \div 100$  раз, срабатывает K1 и включаются рабочие обмотки более мощного K2.





При малой освещенности его сопротивление велико и заперт. При освещении BLD сопротивление в направлении уменьшается много раз, ток базы резко возрастает.

Характеристики и параметры фотоэлементов изменяются с изменением температуры (менее чувствительные – вакуумные, наиболее – полупроводниковые).

**Темновой ток фотоэлемента** – ток при отсутствии источника света. Наименьший темновой ток у газонаполненных и вакуумных фотоэлементов  $\leq 10^7$  Ом. У фотодиодов – десятки мкА; темновое сопротивление резисторов –  $10^5 \div 10^7$  Ом.

**Утомляемость фотоэлементов** – уменьшение их чувствительности при непрерывном освещении. Наибольшая утомляемость в первые  $100 \div 150$  часов работы (чувствительность уменьшается в несколько раз). Обычно после прекращения освещения чувствительность восстанавливается.

### Индуктивные преобразователи (разновидность параметрических преобразователей)

Имеют по сравнению с резисторными преобразователями более высокую надежность, отсутствие скользящих контактов.

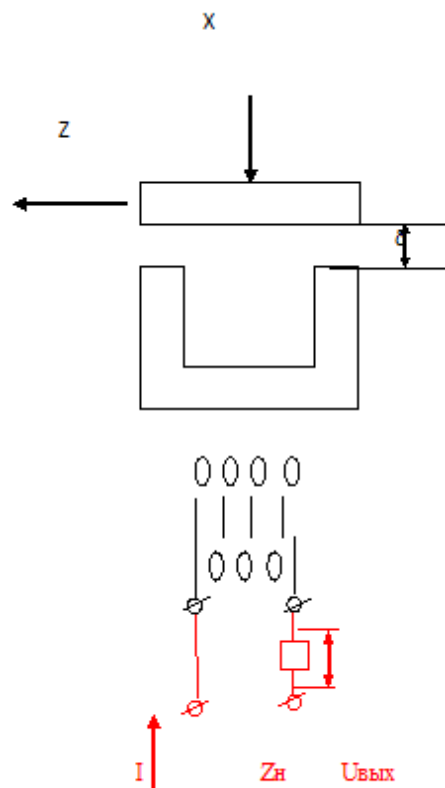
**Недостатки:** наличие остаточного сигнала, чувствительность к изменению напряжения питания, наличие фазовых искажений.

Применяются для измерения угловых и линейных перемещений, контроля изменения давления, расходов жидкостей и газов и т.д.

Известно, что индуктивность  $L$  электромагнитной цепи (рис.) в виде магнитопровода с обмоткой и воздушным зазором без учета рассеяния магнитного потока равна:

$$L = \frac{\omega^2}{Z_{\Sigma}} = \frac{\omega^2}{\sqrt{(R_{\Sigma} + R_{\delta})^2 + X_{\Sigma}^2}}$$

где:  $w$  – число витков обмотки;  $Z_{\Sigma}$  – полное магнитное сопротивление цепи;  $R_{\Sigma}$  и  $X_{\Sigma}$  – активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления магнитопровода;  $R_{\delta}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора.



$$R_{\Sigma} = \frac{l_{\Sigma}}{\mu S_{\Sigma}}$$

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{2P_{\Sigma}}{\omega \Phi_{\Sigma}^2}$$

$l_{\Sigma}$  – средняя длина магнитопровода

$P_{\Sigma}$  – потери мощности в магнитопроводе

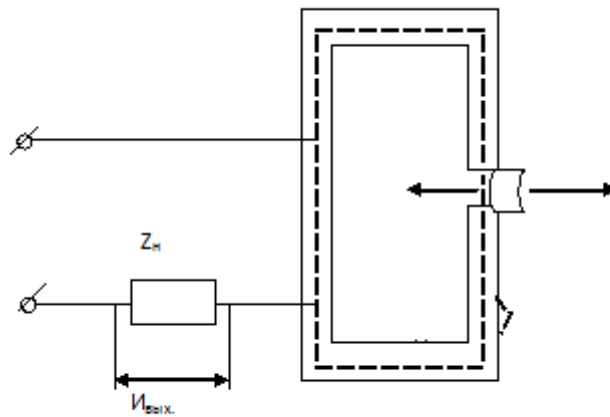
$S_{\Sigma}$  и  $S_{\delta}$  – площади поперечного сечения магнитопровода и воздушного зазора

$\mu$ ,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость материала магнитопровода и воздуха

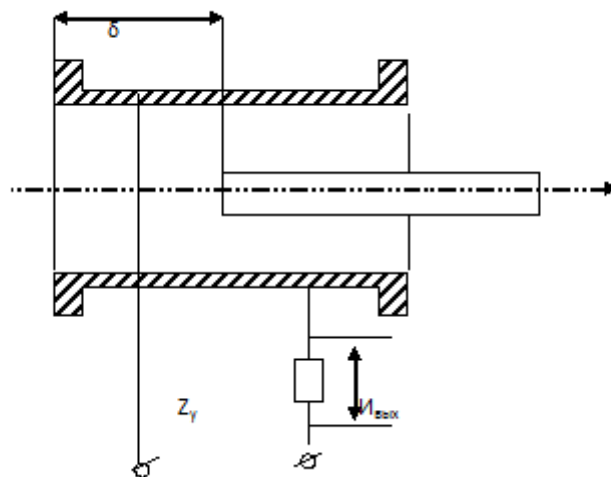
$\omega$  – угловая частота питающего напряжения.

Наибольшее применение нашли датчики с переменными величинами воздушного зазора, площади зазора или магнитной проницаемости (магнитоупругие датчики).

## Индуктивный датчик с переменной площадью сечения



### Плунжерного типа:



Индуктивные датчики с переменным воздушным зазором используют для измерения перемещений в диапазоне 0,1÷1 мм (при увеличении  $\delta$  – нелинейная характеристика).

С переменной площадью сечения – до 5÷8 мм., плунжерного типа до 50 мм.

Для питания индуктивных датчиков используют питание как 50 Гц, так и 400, 500, 1000 Гц (что позволяет изменять их габаритные размеры).

**Недостатки** простейших индуктивных датчиков: наличие  $U_{ост}$  при  $\delta=0$ , низкая чувствительность при малых перемещениях, не реагирует на изменение знака входной величины (однотактные). Более совершенными являются двухтактные (реверсивные) индуктивные датчики, обычно их включают по дифференциальной или мостовой схеме.

Двухтактный индуктивный датчик с подвижным якорем и дифференциальной схемой

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{I}_2 &\Rightarrow \dot{I}_* = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0 \\ &\Rightarrow \dot{U}_{*} = \dot{I}_* Z_* = 0 \end{aligned}$$

При среднем положении якоря ( $\delta' = \delta''$ ) индуктивности обеих катушек равны, следовательно равны

Перемещение якоря вызывает изменение индуктивности катушек:

### **Емкостные датчики**

(преобразователи параметрического типа).

Емкостные датчики реализуют принцип изменения емкости конденсатора при воздействии входной величины.

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Основные параметры и характеристики емкостных датчиков: начальная емкость  $C_0$ , реактивное и активное  $R_C$  сопротивления, тангенс угла электрических потерь

$\tan(\delta)$ , постоянная времени  $T = R_C C_0$ , максимальное изменение емкости  $\Delta C$ , сила взаимодействия электродов, чувствительность, статическая и динамическая характеристики.

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

Так как емкость плоского конденсатора зависит от: площади электродов  $S$  (см<sup>2</sup>), расстояния между электродами  $d$  (см), диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$  (пФ/см) между электродами, т.е. то емкостные датчики выполняют 3-х типов: с изменяемыми  $S$ , или  $d$ , или  $\epsilon$ .

Эти датчиков характеризуют следующие статические характеристики:

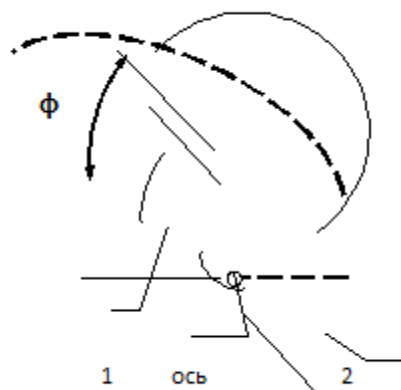
$$\Delta C = f(S)$$

$$\Delta C = f(d)$$

$$\Delta C = f(\epsilon)$$

перемещение  $>1$  мм  $0 \div 1$  мм контроль уровня, состава, концентрации

Емкостные датчики с изменяющейся площадью  $S$  электродов применяются для преобразования линейных и угловых перемещений.



Датчики с изменяемым  $d$  для измерения весьма малых перемещений обладают большой чувствительностью ( $0 \div 1$  мм).

Для измерения малых отклонений емкостные датчики включают в мостовые, резонансные и др. схемы. Для увеличения чувствительности емкостных датчиков часто используют источники питания высокой частоты (то 400 Гц до нескольких МГц).

**Достоинства** емкостных датчиков: простота конструкции, высокая чувствительность, малая инерционность, небольшие габариты и масса.

### Трансформаторные преобразователи (датчики)

Трансформаторные преобразователи основаны на изменении взаимной индуктивности между двумя системами обмоток.

Взаимная индуктивность меняется при:

- изменении полного магнитного сопротивления  $Z_m$  цепи
- взаимном перемещении обмоток.

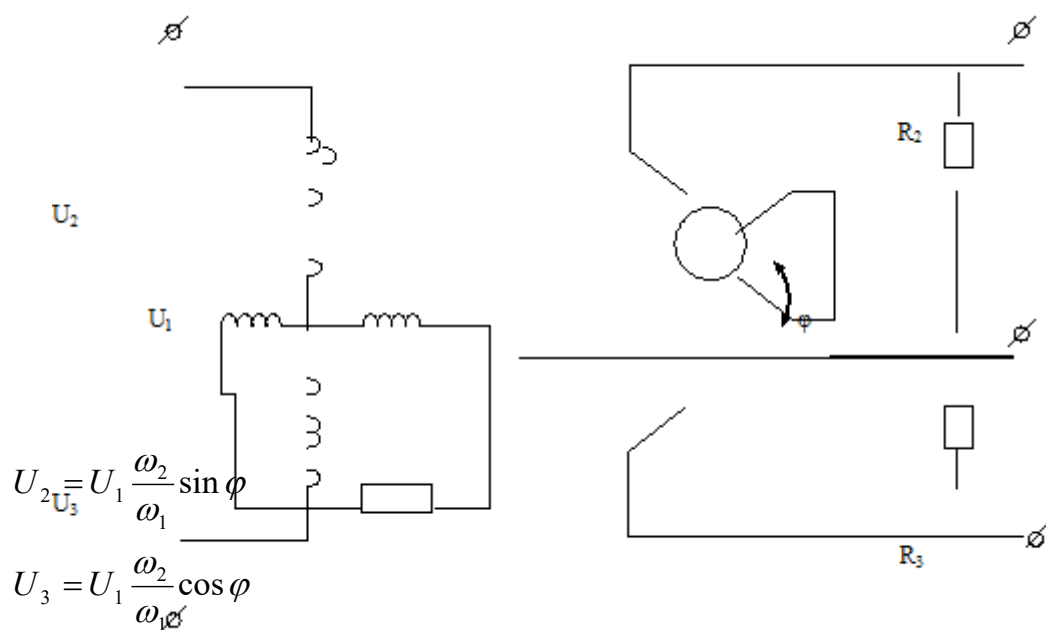
При реализации изменения  $Z_m$  преобразователи аналогичны индуктивным, но имеют вторую систему обмоток. Во 2-м случае – одна из обмоток подвижная.

Часто трансформаторные преобразователи выполняют в виде электрических машин, у которых первичная обмотка расположена на статоре, а вторичная – на роторе (см. курсы: Электро-механические системы, Автоматические приводы).

Сейчас широко используют вращающиеся трансформаторы и сельсины.

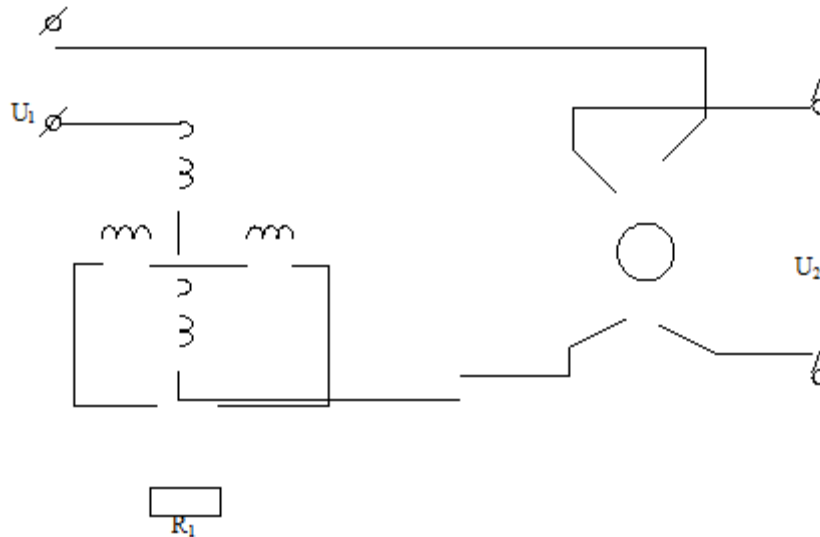
Вращающиеся трансформаторы обычно имеют по две взаимно перпендикулярные обмотки на роторе и статоре и работают либо в режиме линейного вращающегося трансформатора (ЛВТ).

#### Схема трансформаторного преобразователя в режиме СКВТ:



На одну из обмоток статора подают напряжение питания  $U_1$ . Выходные напряжения  $U_2$  и  $U_3$  снимают с обмоток ротора, развернутого относительно статора на  $\varphi$ . (Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  подбирают, чтобы ток  $I$  в обмотках питания был постоянным для любого  $\varphi$ ),  $w_1$ ,  $w_2$  – соответствующее число витков в каждой из обмоток статора и ротора.

#### Схема трансформаторного преобразователя в режиме ЛВТ:



$$U_2 \approx U_1 \frac{\varphi}{1 + \frac{\omega_2}{\omega_1}}$$

Для малых значений  $\varphi$  :

Линейность до 0,75% в пределах  $\varphi = \pm 60^\circ$ .

Разновидностью вращающихся трансформаторов являются сельсины. Их используют для дистанционной передачи угла и в трансформаторном режиме (СД => СП).

Конструктивно сельсины бывают :

- контактные (на статоре однофазная обмотка, на роторе – трехфазная или наоборот)
- бесконтактные (на статоре две обмотки, ротор – специальная конструкция с намагниченной прослойкой).

Достоинством трансформаторных преобразователей, кроме названных у индуктивных, являются: отсутствие гальванической связи между цепями входа и выхода, обеспечение выходного сигнала (напряжения) без дополнительных схем.

### Генераторные преобразователи

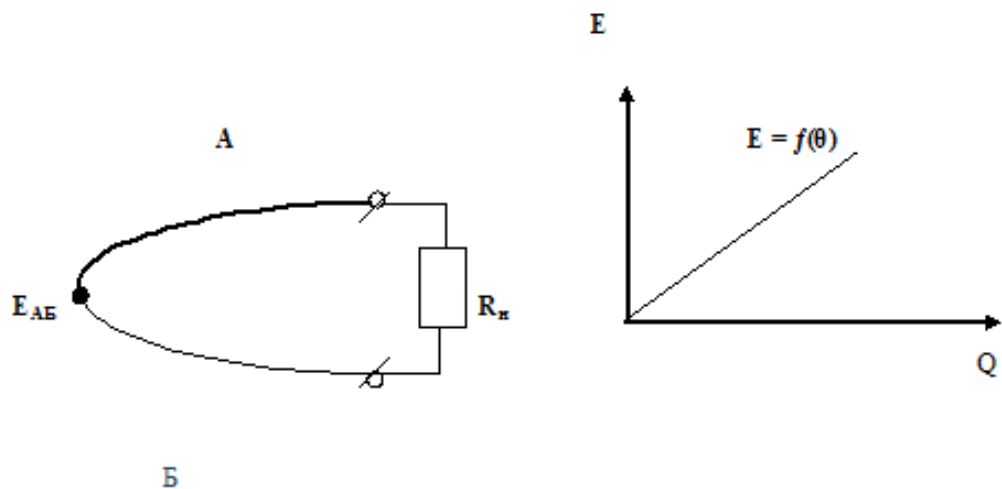
Генераторные преобразователи преобразуют входные (измеряемые) величины в ЭДС. Они используют энергию входной величины и не требуют дополнительных источников питания. Наибольшее применение получили:

- термоэлектрические
- индукционные
- пьезоэлектрические
- фотоэлектрические преобразователи.

### Термоэлектрические преобразователи (термопары).

Термоэлектрические преобразователи имеют чувствительный элемент, образованный двумя электрически соединенными разнородными металлическими проводниками (или полупроводником) и преобразующие значения контролируемой температуры в ЭДС.

Обычно термо ЭДС не рассчитывают, а определяют по экспериментальным градуировочным кривым  $E = f(\theta)$  ( $\theta$  – температура).

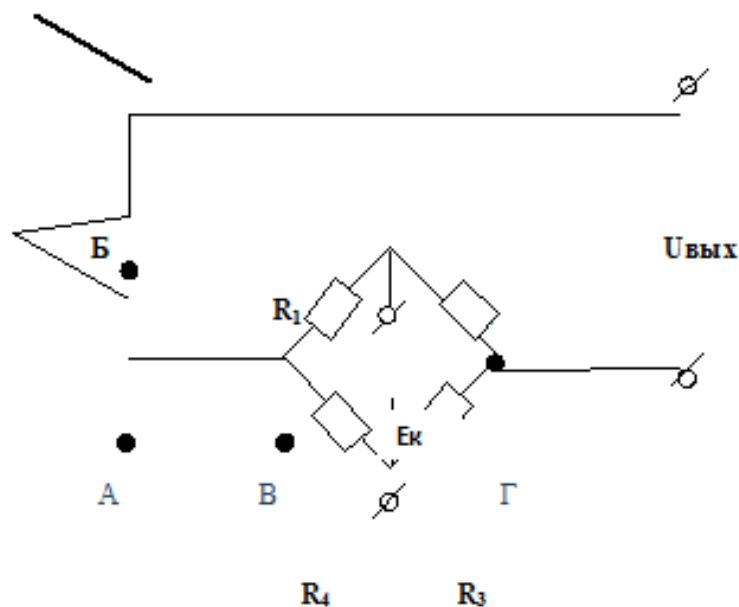


С целью уменьшения погрешности измерений применяются схемы коррекции температурной погрешности.

Характеристики управления термопар ( $E = f(\theta)$ ) обычно нелинейны ( $\sim 5\%$ ).

Источники погрешности: нестабильность температур холодных слоев (к некоторым подключают нагрузку), изменение сопротивления нагрузки (если оно соизмеримо с сопротивлением термопары), отклонения параметров удлинительных проводов от расчетных.

#### Схема коррекции температурной погрешности:



Термопары обычного исполнения характеризуются большой инерционностью (до нескольких минут). У специальных конструкций – несколько секунд.

$$E = k \cdot \Phi \cdot \frac{dx}{dt}$$

$$\Delta\Phi = \frac{F}{R_M} - \frac{F}{R_M + \Delta R_M}$$

**Достоинства:** возможность измерения большого диапазона температур (до 1600°C), простота, надежность.

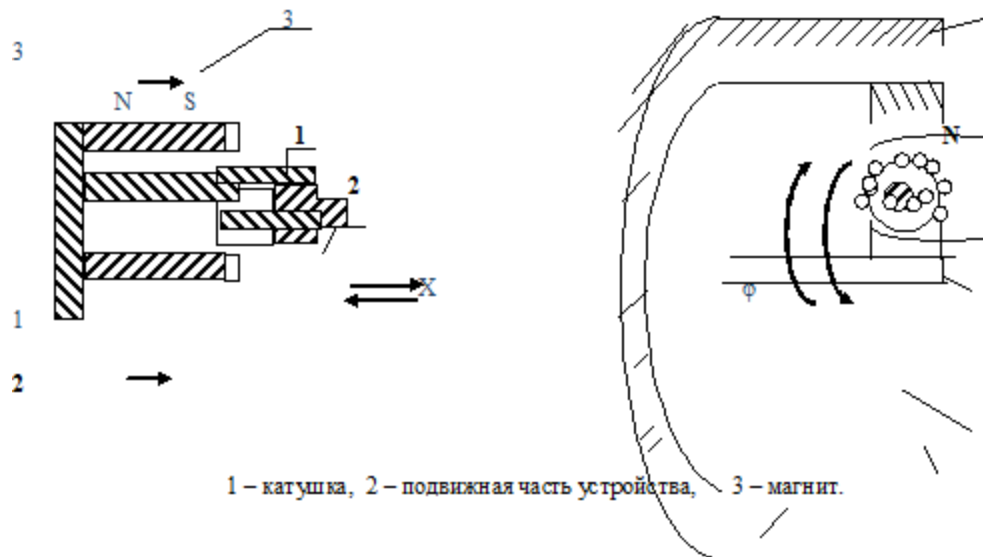
**Недостатки:** невысокая чувствительность, обычно 12÷65 мкВ/°С, необходимость поддержания постоянной температуры холодных слоев.

### Индукционные преобразователи

Индукционные преобразователи состоят из катушки и магнитной системы. Обеспечивают преобразование контролируемой скорости линейных или угловых перемещений в ЭДС.

Индукционные преобразователи подразделяют на две группы:

- преобразователи, у которых катушка перемещается относительно постоянного магнита, совершая линейное  $X$  или угловое  $\phi$  перемещение;
- преобразователи, у которых ферромагнитная деталь перемещается относительно неподвижных магнита и катушки.



ЭДС  $E$  от скорости перемещения является линейной. Практически линейность 0,5÷1,5%.

Источник погрешности обусловлен нестабильностью параметров магнитных материалов во времени, погрешность 0,5÷1%.

**Достоинства** индукционных преобразователей: высокая точность и высокая чувствительность (можно использовать выходной сигнал без усиления и др. обработки).

**Недостатки:** необходимость учета величины нагрузки и окружающих условий, наличие момента (сопротивление), действующего на вал, скорость которого измеряется.

Индукционные преобразователи, предназначенные для измерения угловой скорости и выполненные в виде генераторов постоянного или переменного тока небольшой мощности (1÷100 Вт) называют **тахогенераторами**. (Их чувствительность – несколько вольт на 1000 оборотов в минуту).



## Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи на основе пьезоэффекта преобразуют переменные механические усилия в количество электричества (появление электрических зарядов на гранях некоторых диэлектриков).

$$q_x = k_x \cdot F_x$$

Применяют для измерения вибраций, переменных давлений, усилий и др. параметров.

Чувствительный элемент обычно вырезают из кристалла кварца (или титанат бария) в форме пластинки-параллелепипеда.

Величина зарядов на гранях в пределах упругих деформаций находящихся в линейной зависимости от приложенной силы:

где  $K_p$  – пьезомодуль материала пластинки.

( $K_{p \text{ кварца}} = 2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н при  $t^\circ = 573^\circ\text{C} \Rightarrow K_{p \text{ кварца}} = 0$ ).

$K_{\text{пьезокер.тит.бария}} = 107 \cdot 10^{-2}$  Кл/Н рабочий диапазон температур (+ присадки) =  $-50^\circ \div +200^\circ\text{C}$ ).

Для повышения чувствительности пьезопреобразователь из n-пластин, располагая их столбиком и соединяя параллельно.

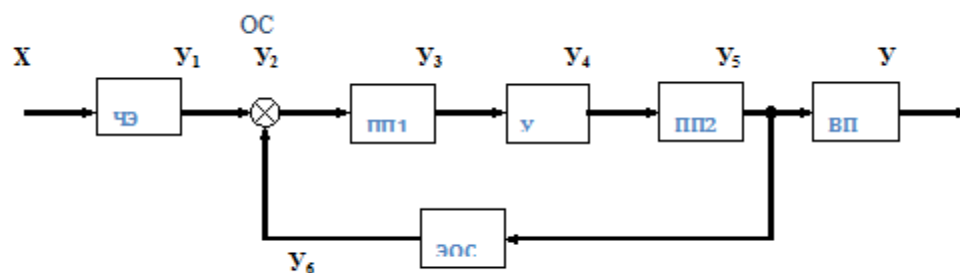
**Достоинства:** широкий частотный диапазон измеряемых величин, малые габариты, простота устройства.

**Недостатки:** невысокая чувствительность (требуется усилие  $\Rightarrow R_{\text{вх усил}} > 100$  к), невозможность измерения статических величин.

## Компенсационные датчики

Компенсационные датчики основаны на принципе автоматического уравнивания контролируемой величины компенсирующей величиной того же рода. Уравнивание контролируемой величины может осуществляться непосредственно или после предварительного преобразования ее чувствительным элементом.

### Структурная схема компенсационного датчика:

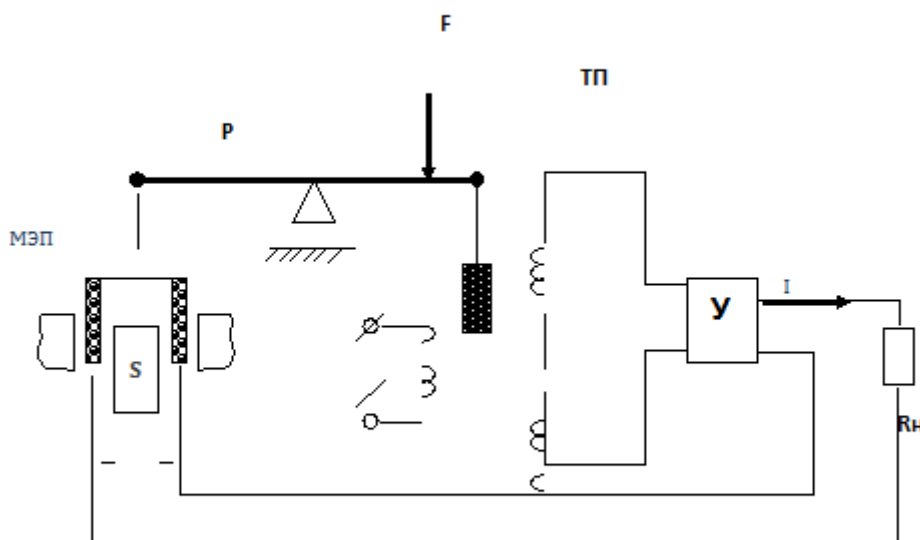


$X$  – контролируемая величина, поступает на чувствительный элемент ЧЭ, выходная величина которой  $Y_1$  сравнивается с помощью органа сравнения ОС с величиной  $Y_6$ . Разностный сигнал  $Y_2 = Y_1 - Y_6$  подается на промежуточный преобразователь ПП1, на выходе которого сигнал  $Y_3$  удобный для усиления. С выходного усилителя  $У$  сигнал на второй промежуточный преобразователь ПП2, преобразованный сигнал в форму, удобный для использования. Элемент обратной связи ЭОС обеспечивает подачу компенсирующей величины на второй вход ОС.

Часто схема компенсационного датчика имеет более простой вид, но всегда есть цепь отрицательной обратной связи. Точность измерений компенсационным датчиком мало зависит от нестабильности характеристик управления звеньев, охваченных ОС, а определяется в основном стабильностью работы ЭОС, входных и выходных элементов.

**Недостатки:** более сложные.

#### Схема компенсационного датчика усилий:



Контролируемое усилие  $F$  изменяет положение рычага  $P$ , перемещение которого преобразуется трансформаторным преобразователем  $ТП$  в электрический сигнал, усиливаемый и преобразуемый в уровень постоянного тока  $I$  усилителем  $У$ . Ток  $I$  поступает в обмотку магнитоэлектрического преобразователя  $МЭП$ , который создает силу, уравнивающую контролируемое усилие  $F$ . Так как уравнивающая сила пропорциональна выходному току  $I$ , то по его величине можно определить значение  $F$ .

#### Фазовые датчики

Фазовые датчики (фазовращатели) преобразуют входную величину в фазовый сдвиг выходного переменного напряжения. Фазовый сдвиг отсчитывается обычно относительно опорного переменного напряжения (например, напряжение питания).

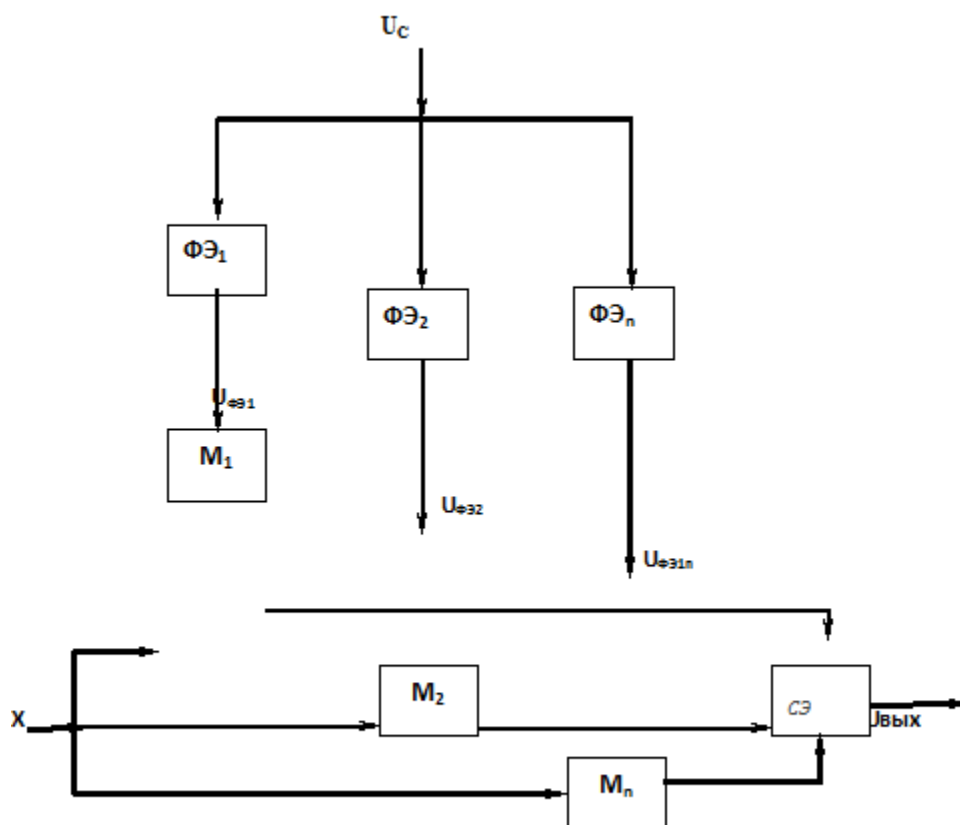
Фазовые датчики применяются для преобразования:

- электрических величин (часто напряжение постоянного или переменного тока в фазовый сдвиг); (фазовая модуляция – специальный курс радиотехники)
- неэлектрических (линейное или угловое напряжение в фазовый сдвиг).

Позволяют получать линейные преобразования во всем диапазоне изменений величины фазового сдвига (от 0 до 20) и обеспечивают высокую точность преобразования.

Более надежны и эффективны параметрические фазовые датчики. Они состоят из фазосдвигающих элементов, функциональных параметрических преобразователей и суммирующего элемента. В зависимости от взаимного включения этих элементов различают датчики с многофазным питанием и датчики с однофазным питанием.

### Структурная схема фазового датчика с многофазным питанием:



$$U_{M_i} = U_{\Phi Э_i} [R_{0i} + R_{mi} \cos(X + \beta_i)]$$

$$R_{0i}, R_{mi}, \beta_i$$

$U_C$  – напряжение сети ( $U_C = U_m \cdot \sin(\omega t)$ ) сдвигается по фазе фазосоставляющими элементами  $\Phi Э_1, \Phi Э_2 \dots \Phi Э_n$  на различные фазовые углы  $\alpha_i$ .

Выходные напряжения  $U_{\Phi Э_1}, U_{\Phi Э_2} \dots U_{\Phi Э_n}$  этих элементов модулируется по амплитуде параметрическими преобразователями (модуляторами  $M_1, M_2 \dots M_n$  по закону:

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot U_{M_i} = U_{mc} \cdot \sin(\omega t - x + \varphi)$$

параметры  $i$ -го модулятора;  $X$  – входное перемещение, и суммируются элементом С  
Выходное напряжение датчика :

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n B_i \sin(\alpha_i - \beta_i)}{\sum_{i=1}^n B_i \cos(\alpha_i - \beta_i)}$$

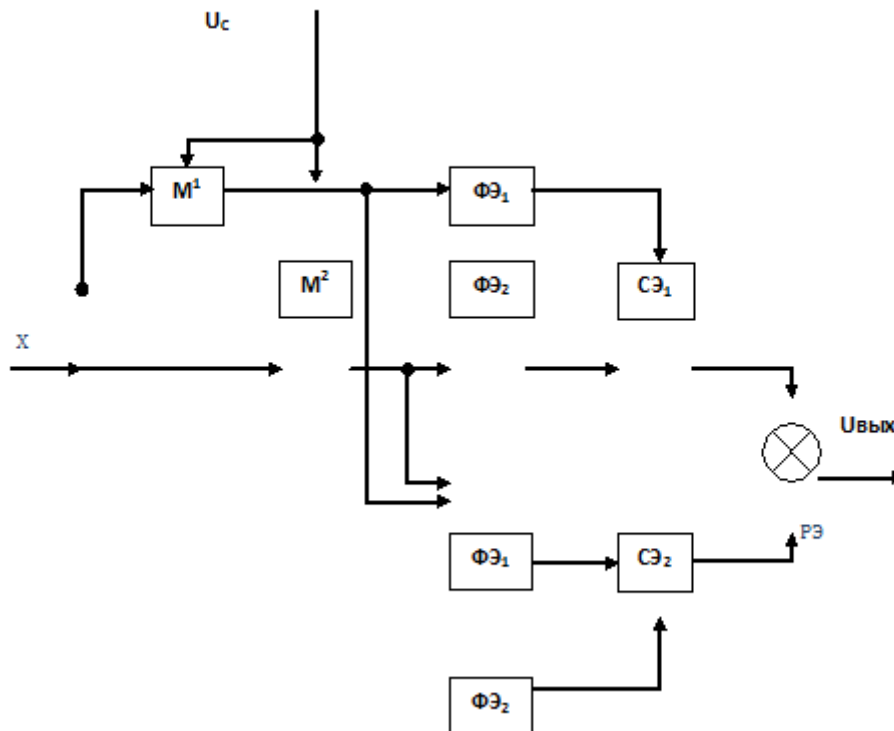
где  $K_i$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров ФЭ $_i$  и СЭ.

Наибольшее распространение получили двухфазные и трехфазные схемы преобразователей. Точность этих датчиков существенно зависит от стабильности величины  $\varphi$ , определяемой:

Для повышения точности датчика используют стабилизацию его параметров или компенсационные схемы.

Из компенсационных схем более перспективны дифференцирующие схемы и схемы с многофазным выходом.

### Структурная схема дифференциального датчика с однофазным питанием:



Основой является предыдущая схема.

В схеме 2 комплекта элементов: ФЭ, СЭ, и разностный элемент РЭ. Благодаря показанному включению (ФЭ $_1$  и ФЭ $_2$  в цепи СЭ $_2$  включены в обратном порядке по сравнению с ФЭ в СЭ $_1$ ), фазы сигналов на выходах СЭ $_1$  и СЭ $_2$  :

$$\varphi_1 = x + \Delta x$$

$$\varphi_2 = -x + \Delta x + \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_{\text{вых}} = \varphi_1 - \varphi_2 = 2x - \frac{\pi}{2}$$

Таким образом погрешность в выходном сигнале исключается, а результат удваивается.

**Недостатки:** диапазон измеряемых величин сужается (до  $\pi$ , вместо  $2\pi$ ).

Аналогично строится структурная схема дифференцирующего датчика с многофазным питанием.

### Частотные датчики

Частотные датчики преобразуют входную величину в частоту переменного тока, изменяющуюся в соответствии с изменением контролирующей величины.

Выходные сигналы частотных датчиков относительно просто могут быть преобразованы в цифровую форму (числовой код) и передаваться без существенных искажений по линиям связи. Частотные датчики обладают высокой помехоустойчивостью, независимостью выходного сигнала от изменения параметров линий связи, возможным исполнением одной линии связи для параллельной передачи нескольких сигналов, разнесенных по частоте (избирательные усилители).

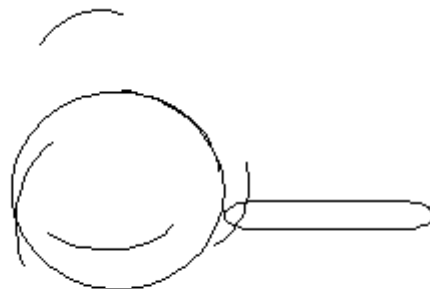
По способу получения выходных сигналов частотные датчики разделяют на:

- Позиционные (выходной сигнал формируется в результате перемещения входного элемента, при этом частота следования выходных сигналов пропорциональна скорости перемещения элемента).
- Колебательные (выходной сигнал создается с помощью колебательных систем).

Позиционные частотные датчики делятся на:

- модуляторные
- генераторные.

В позиционных модуляторных частотных датчиках требуемая (соответствующая) частота получается в результате модуляции выходного сигнала (тока, напряжения) с помощью параметрических преобразователей, предназначенных для измерения перемещений.



Считывающий элемент, выходной сигнал зависит от того, зубец или выемка проходят возле него.

Индуктивность этой катушки изменяется с частотой, пропорциональной скорости вращения ЗЭ.

С такой же частотой будет изменяться амплитуда сигнала на выходе катушки, включенной по одной из схем индуктивного амплитудного датчика.

Частота сигнала на выходе датчика:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \cdot Z$$

где  $Z$  – число зубцов колеса.

В позиционных **генераторных частотных** датчиках на выходе генерируется ЭДС, частота которой зависит от скорости  $\omega$  вращения подвижной части – ротора датчика. В качестве частотного датчика может быть использован индукционный преобразователь – тахогенератор переменного тока. Выходным сигналом является ЭДС (напряжение), частота которого

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot p \cdot \omega$$

где  $p$  – число пар полюсов.

Позиционные частотные датчики:

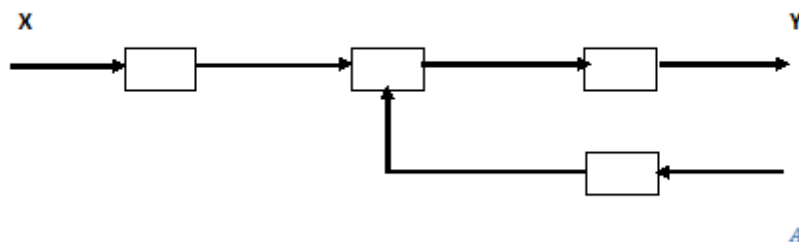
**Достоинства:** высокая точность (преобразования), возможность работы в широком диапазоне измеряемых величин.

**Недостатки:** наличие вращающихся элементов (уменьшение срока службы).

Колебательные частотные датчики делятся на:

- датчики свободных колебаний
- автоколебательные датчики.

**Структурная схема частотного датчика свободных колебаний:**



**ПП** – предварительный преобразователь.

**КК** – колебательный контур.

**ВП** – выходной преобразователь.

**ВЭ** – возбуждающий элемент.

Управление работой датчика обычно путем подачи на ВЭ схемы сигнала запроса А. ВЭ вырабатывает сигнал, который вызывает колебания в КК.

Разновидностью частотного датчика свободных колебаний являются струнные датчики. Резонансная частота датчика:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}}$$

где  $F$  – сила натяжения струны,  $m$  – масса,  $l$  – длина струны.

Автоколебательные датчики используют свойства автоколебательных систем, характеризуются наличием незатухающих колебаний, амплитуда и частота которых определяются свойствами самой системы и не зависят от начальных условий. Потери энергии в автоколебательных системах компенсируются источниками питания.

$$f \approx \frac{U_x}{4B_c \cdot S \cdot \omega}$$

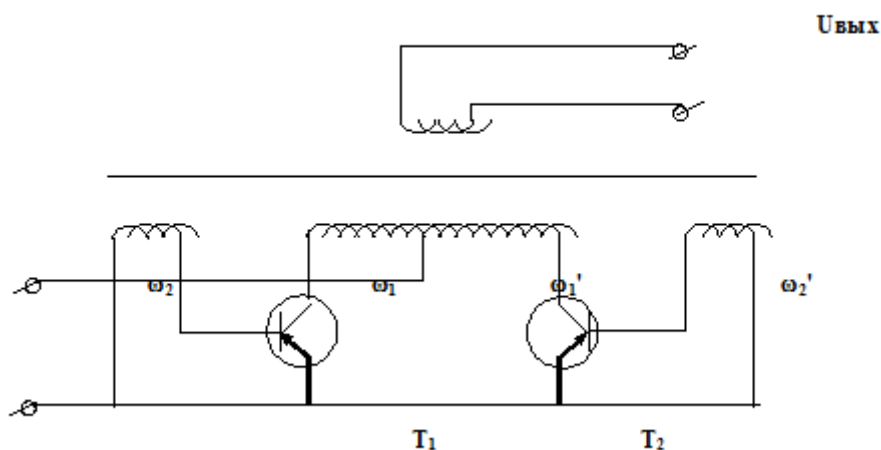
Датчики с электрической автоколебательной системой представляют собой генераторы частоты, в частотно-зависимые цепи которых включают параметрические резисторные, индуктивные или емкостные преобразователи.

Генераторы частоты делятся на:

- с колебательными системами (LC контур);
- с апериодическим фильтром (RC генераторы);
- релаксационные генераторы (мультивибраторы, блокинггенераторы).

Например:

**Схема мультивибратора с магнитной связью (двухтактный блокинггенератор):**



$U_x \equiv E_k$ . Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  имеет форму импульсов с частотой:

$$U_{\text{вых}} = F(U_x)$$

$$U_{\text{вых}} = F(U_x)$$

где  $B_c$  – индукция насыщения,  $S$  – сечение сердечника,  $\omega_1$  – число витков в  $\frac{1}{2}$  первичной обмотки.

Таким образом, нашли применение также датчики с механической колебательной системой: струнные, камертонные, язычковые и др. Выходные сигналы таких датчиков лежат в диапазоне от нескольких Гц до нескольких кГц. Погрешность составляет примерно  $0,01 \div 1\%$ .

### Времяимпульсные датчики

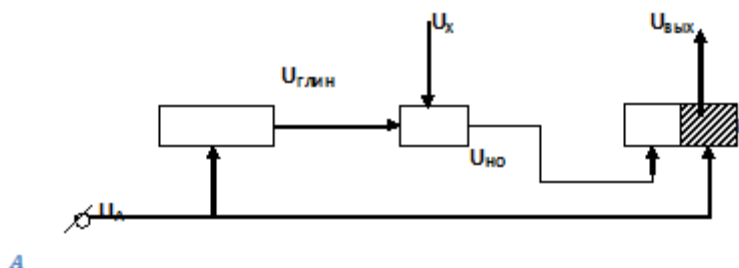
Время-импульсные датчики преобразуют входную величину в пропорциональный временной интервал. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с амплитудными датчиками. Выходные сигналы импульсных датчиков сравнительно просто преобразовать в цифровую форму, практически без искажения по линиям и т.д.

Время-импульсные датчики выполняют:

1. с периодическим выходным сигналом – выходной сигнал выдается циклически с постоянным периодом  $T_{ц}$ ;
2. с непериодическим выходным сигналом – выходной сигнал подается в произвольные моменты времени, определяемые характером изменения сигнала или заданной программой измерений.

Времяимпульсные датчики используют для преобразования во временной интервал: напряжения, тока, электрических параметров ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), линейных и угловых механических перемещений (возможно использование и для измерений др. параметров, но с промежуточным преобразованием их в напряжение).

#### Структурная схема времяимпульсного датчика (с периодическим выходным сигналом):



На второй вход НО поступает контролируемое напряжение  $U_x$ . В момент равенства мгновенного напряжения  $U_{глин}$  с  $U_x$  НО выдает импульс  $U_{но}$ , поступающий на триггер Т. триггер Т запускается импульсом А и возвращается в исходное состояние импульсом НО. Длительность временного интервала  $t_n$  выходного напряжения  $U_{вых}$  триггера пропорциональна измеряемому напряжению.

$$t_n = \frac{U_x}{K_r}$$

где  $K_r$  – коэффициент напряжения ГЛИН.

### Цифровые датчики и преобразователи

Цифровые датчики и преобразователи обеспечивают более высокую разрешающую способность, точность, быстродействие и точность по сравнению с аналоговыми преобразователями.



Принцип действия цифровых датчиков угловых и линейных перемещений основан на модуляции светового или магнитного потока при соответствующем перемещении подвижного элемента датчика (также используются цифровые датчики контактного типа).

Наиболее высокая точность измерения при использовании позиционных оптических кодирующих дисков и линеек (современные цифровые датчики типа: угол-код обеспечивают точность, соответствующую 20 двоичным разрядам).

В зависимости от способа считывания информации цифровые датчики делятся на:

- датчики абсолютных значений (с периодическим опросом);
- датчики накапливающего типа (датчики приращений).

В накапливающих цифровых преобразователях используют датчик и счетную схему, суммирующую отдельные приращения.

Основные технические характеристики цифрового датчика: угол-двоичный код:

- диапазон преобразования угла;
- число двоичных разрядов  $m$  или числовая емкость  $Z_m$  датчика;
- способ представления выходного числа  $G$  (последний или параллельный двоичный код);
- частота опроса (цифрового датчика) или такт квантования  $T_{кв}$  непрерывной преобразуемой функции  $\varphi(t)$ ;
- статическая и динамическая точность преобразования.

### Принцип действия ЦД угол-код

Цифровой датчик угол-код индукционного типа состоит из электро-механического кодирующего устройства (КУ) и электронного блока.

Принцип действия КУ ЦД основан на модуляции кодирующим диском связи (магнитного потока) между двумя сердечниками 1, 2 импульсного транзистора с воздушным зазором (имеющего подвижную и вторичную обмотки).

Первичная обмотка  $\omega_1$  трансформатора периодически возбуждается импульсами тока малой длительности. В обмотке  $\omega_2$  индуктируются импульсные ЭДС, амплитуда которых зависит от коэффициента взаимоиндукции, который изменяется при повороте кодирующего диска 3 на угол  $\varphi$  вокруг оси 4.

Если в воздушном зазоре между торцами сердечников 1, 2 транзистора находится збег диска, то импульсная ЭДС в  $\omega_2$  будет минимальной  $\rightarrow$  выходной сигнал соответствует символу "0".

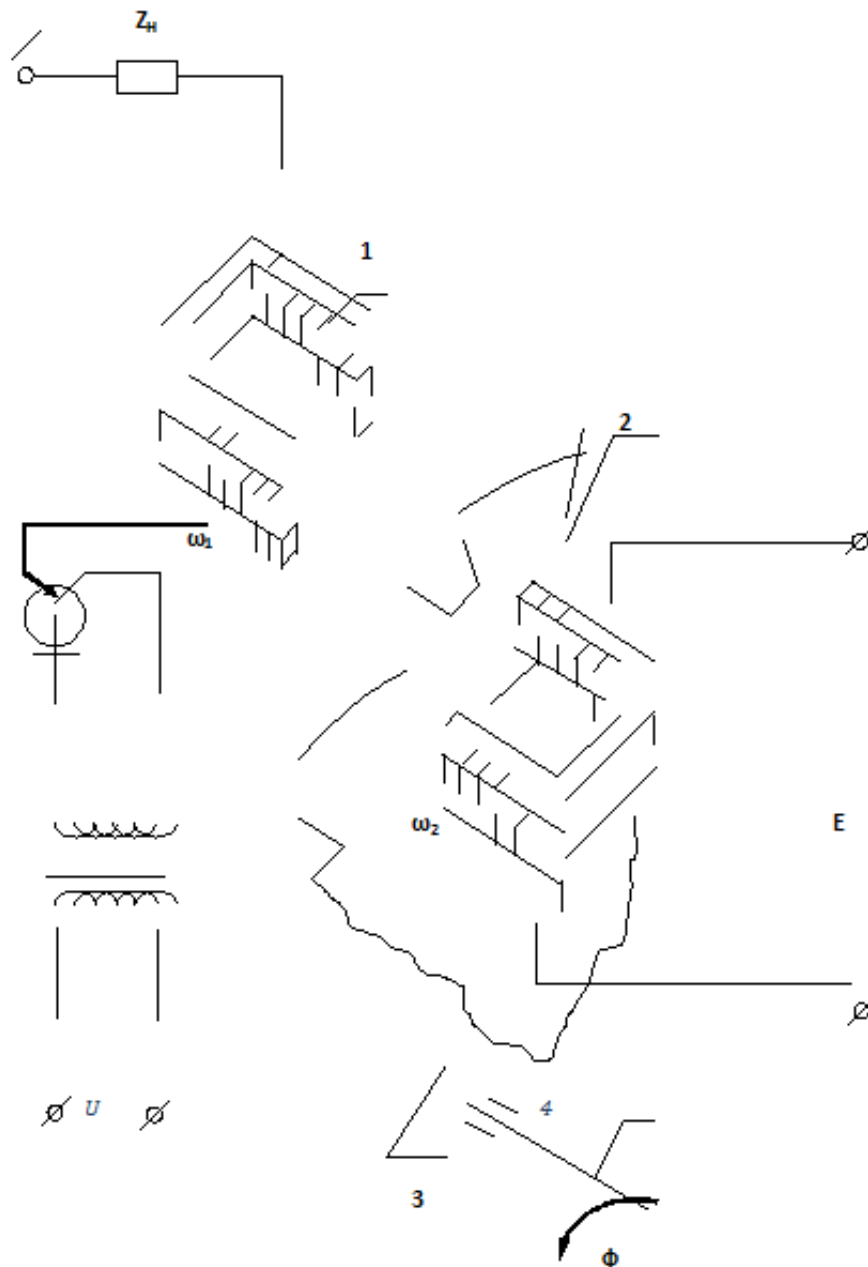
Если в зазоре «впадина» диска  $\rightarrow$  то ЭДС в  $\omega_2 = \max \rightarrow$  "1".

Сердечники 1, 2 транзистора не являются точечными, поэтому при повороте КД в пределах угла  $\varphi = \Delta$ , ЭДС в  $\omega_2$  изменяется плавно, а не скачком. Кривую  $E = f(\varphi)$  называют **модуляционной характеристикой КУ**. Угол поворота диска, соответствующий интервалу плавного изменения ЭДС от 0 до 1, называют **зоной неопределенности символа**.

Неидеальность считывающей системы, т.е. погрешности элементов датчика, практически исключают применение простых дисков (выполненных по закону двоичного кода).

Находит применение двоично-сдвинутое кодирование (V-метод, код Баркера) при котором представление каждого разряда (за исключением 1-го) осуществляется двумя подразрядами (дорожками) А и Б.

Применение двоично-сдвинутого кодирования исключает возможность появления ошибок на границах соседних разрядов, расширяет диапазон допусков на изготовление диска и гостировку импульсных трансформаторов.



- 1, 2 – сердечники импульсного транзистора;  
 $\omega_1, \omega_2$  – обмотки;  
 3 - кодирующий диск;  
 4 – ось вращения.

Цифровой датчик линейных перемещений.

$$T_{\text{кв}} = \frac{1}{F_{\text{кв}}}$$

Цифровой датчик линейных перемещений – это датчик с модуляцией, осуществляющий эквивалентное преобразование непрерывной временной функции в импульсные сигналы на выходе. Такие датчики фотоэлектронного типа применяют для точного измерения перемещения суппорта металлорежущего станка с ЧПУ. Они представляют собой автономное измерительное устройство, состоящее из кодирующей решетки (линейки) и сканирующей головки с встроенным электронным модулем, осуществляющим обработку сигналов, получаемых с фотоприемников головки.

## Преобразователи электрических сигналов

Преобразователи электрических сигналов являются типовыми элементами систем автоматики и выполняют функции согласующих устройств без изменения количества информации, содержащейся в преобразуемом сигнале.

Основное техническое требование к преобразователям: точность и стабильность преобразования, высокое быстродействие.

### Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) осуществляют преобразование входной аналоговой величины в соответствующий ей цифровой код.

АЦП классифицирую по:

- виду квантования аналоговой величины;
- физическому виду входной величины;
- принципам измерения преобразуемой величины;
- методам преобразования.

В АЦП входная аналоговая величина преобразуется в конечное число дискретных значений (квантуется).

Используют следующие виды квантования:

1. **по уровню** (когда фиксируются уровни генерирующего сигнала в произвольные моменты времени);
2. **по времени** (когда фиксируются произвольные значения непрерывного сигнала в фиксированные моменты времени);
3. **одновременно по уровню и по времени.**

По методам преобразования АЦП делятся на 3 основные группы:

1. **С пространственным кодированием** (используют метод пространственного кодирования, основанный на преобразовании мгновенного значения преобразуемой величины в пропорциональное пространственное перемещение кодирующей шкалы (или считывающей системы относительно кодирующей шкалы)).
2. **Числоимпульсные** (осуществляют преобразование аналоговой величины в пропорциональное ей число импульсов, которое посредством счетчиков переводится в цифровой код. Используют время-импульсные и частотно-импульсные методы преобразования).
  - a. при время-импульсном методе: непрерывная величина преобразуется в пропорциональный интервал времени, в течение которого на счетчик поступает определенное число импульсов.
  - b. при частотно-импульсном методе: измеряемая величина преобразуется в соответствующую частоту выходного сигнала и в число импульсов, поступающих на счетчик за калиброванный интервал времени.
3. **Преобразователи с уравниванием** (используют последовательное сравнение мгновенное значение преобразуемой величины с рядом заранее известных «образцовых» величин, изменяющихся по определенному закону).

На АЦ-преобразование затрачивается некоторый интервал времени, поэтому цифровой выходной сигнал обычно запаздывает по отношению к собственному мгновенному значению аналогового сигнала.

Основные характеристики АЦП:

- такт квантования;
- апертурное время;
- точность преобразования.

Апертурное время  $\Delta T_A$  – временной интервал, характеризующий неопределенность момента преобразования выборочного значения сигнала и вызывающий появление дополнительной динамической погрешности:

$$\Delta T_A = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot 2^m}$$

где  $f$  – частота сигнала (Гц), которая при прохождении через нулевой уровень изменяется за апертурное время на единицу младшего разряда;  $m$  – число разрядов двоичного числа.

Максимальная точность АЦ-преобразования ограничена погрешностью квантования, зависящей от разрядной сетки и максимальной скорости изменения преобразуемого сигнала.

Погрешность преобразования:

$$\Delta \epsilon = \pm \frac{0,5(1 + k \cdot \Delta T_A)}{2^{m-1}}$$

где  $k$  – скорость изменения входного аналогового сигнала, выраженная через число единиц младшего по весу разряда за 1 с.

Схема предназначена для преобразования в цифровую форму любой из 16 аналоговых входных величин с 12-разрядным кодом на выходе (например, для сбора данных под управлением микропроцессора).

Мультиплексор (ИС НІ – 506) имеет особенность:

- его ключи являются разновидностью ключей с «размыканием перед срабатыванием», т.е. при смене адреса на мультиплексоре различные входные каналы не замыкаются друг с другом.

Единственный аналоговый выход мультиплексора поступает на схему LF 398 – усилитель с выборкой и запоминанием. Эта схема используется как схема «слежения и запоминания», фиксирующая аналоговое колебание только с началом преобразования.

AD7572 – 12-разрядный АЦП с внутренним источником опорного напряжения и тактовым генератором. Устройство, управляющее этой схемой, обычно назначает адрес для мультиплексора, затем инициирует преобразование с помощью сигналов **ВК** и **ЧТ**. АЦП отвечает выдачей сигнала **ЗАНЯТ**, который фиксирует аналоговый входной сигнал.

Преобразование завершается через 12 мкс и сигнал **ЗАНЯТ** устанавливается на высоком уровне. С этого момента доступны все 12 разрядов результата, если предполагается использовать все 12 линий **Двых**; если имеется 8-разрядная шина, то первыми считают 8 младших значащих разрядов, затем подают сигнал **ВЫБОР СТАРШЕГО БАЙТА**, чтобы передать на **Д<sub>0</sub> – Д<sub>3</sub>** 4 старших значащих разряда.

После инициирования преобразования устройство, управляющее преобразователем, проверяет сигнал **ЗАНЯТ**, чтобы зафиксировать завершение преобразования. (Более простой вариант – ожидание в течение 12 мкс – «временный цикл» программы).

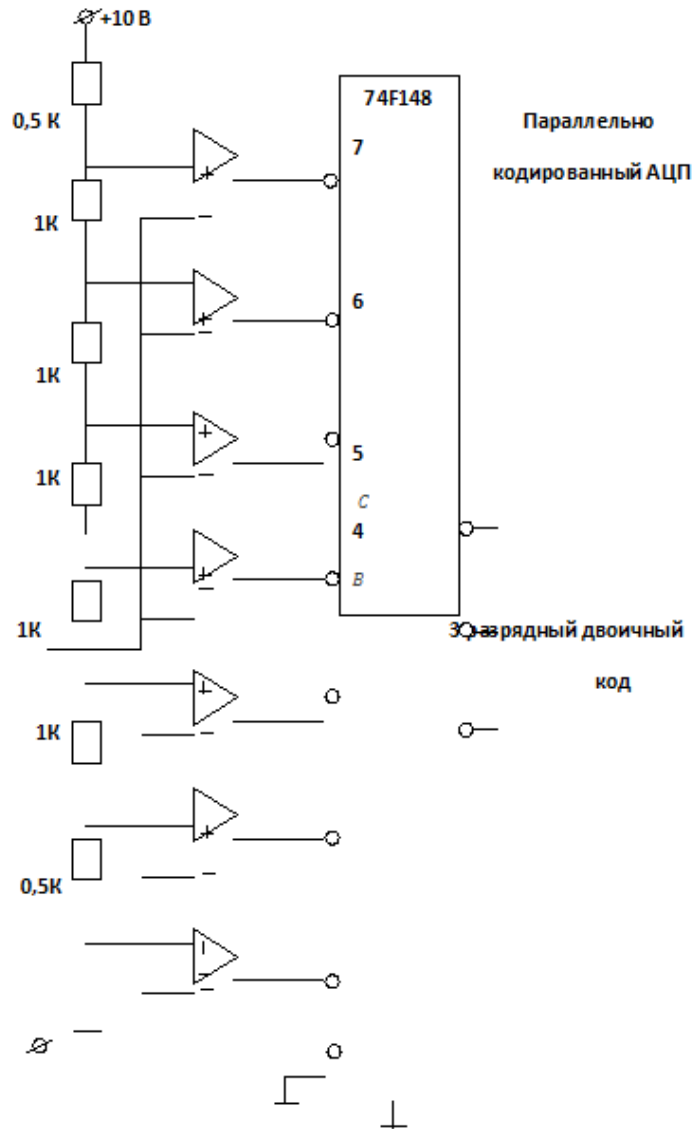
Управляющее устройство ожидает 4 мкс после завершения преобразования перед тем, как инициировать следующее преобразование – это время, необходимое для ИС LF 398, чтобы выход вновь отследил вход с точностью до 0,1%. Общее время преобразования составляет 16 мкс, что равнозначно 60000 преобразований в секунду. Схема стоит ~ 50 \$, в том числе преобразователь 35\$.

Как правило, обычно применяют готовые АЦП модули или ИС, а не разрабатывают их сами.

## Способы преобразования

### 1. Параллельное кодирование

В этом методе напряжение входного сигнала подается на один из входов “n” компараторов одновременно; другие входы компараторов подключены к “n” опорным источникам с равномерно распределенными напряжениями. Шифратор (с приоритетом) формирует цифровой выходной сигнал, соответствующий самому старшему компаратору из активизированных входным сигналом.

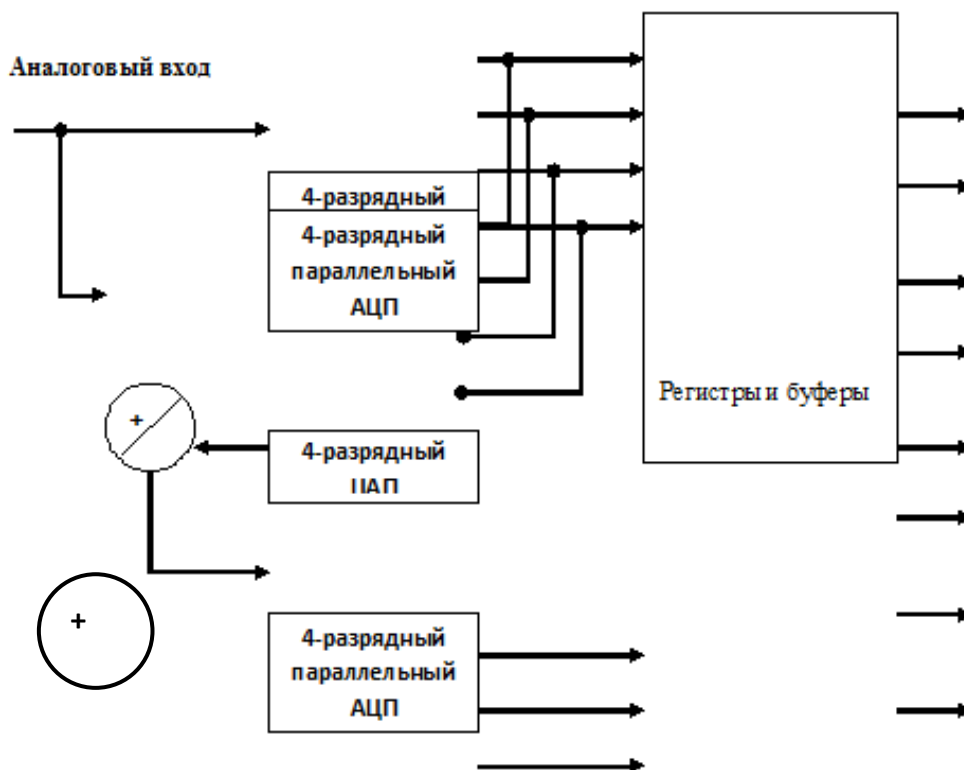


Параллельное кодирование (или «мгновенное» кодирование) – это самый быстрый метод АЦ-преобразования. Время задержки от входа до выхода равно сумме задержки на компараторе и шифраторе. Параллельные преобразователи, выпускаемые серийно, имеют от 16 до 1024 уровней квантования (с выходами от 4 до 16 разрядов). Увеличение числа разрядов возможно, но → цена, габариты ↑. Быстродействие от 15 до 300 млн. отсчетов в сек.

**Пример:** АЦП TDC 1048 фирмы TRW: биполярный 8-разрядный преобразователь на 20 млн. отсчетов в сек., в 28-выводном корпусе, цена ~ 100 \$.

Существуют варианты более простого (и дешевого) параллельного шифратора – «полумгновенный» шифратор, в котором используется двухступенчатый процесс: вначале мгновенное преобразование входа до половины заданной точности, затем внутренние

ЦАП вновь преобразуют это приближенное значение в аналоговую величину, и разность между ней и входной величиной подвергается мгновенному преобразованию для получения младших значащих разрядов:



### Полупараллельный АЦП

Этот способ дешев и обладает самым высоким быстродействием, за исключением полностью «мгновенного».

Представляет интерес использование «мгновенных» шифраторов в области преобразования колебаний в цифровую форму (даже при сравнительно низкой скорости преобразования).

Их быстродействие (точнее, малый апертурный интервал, в течение которого фиксируется выход компаратора) гарантирует, что входной сигнал за время преобразования существенно не изменяется. В других схемах необходимо использование запоминающих устройств для фиксации входного колебания на время преобразования.

### Последовательное приближение

В этом способе осуществляется опробование различных выходных кодов путем показа их на АЦП и сравнения результата с аналоговым входом с помощью компаратора. Процесс начинается с установки всех разрядов в "0". Для " $n$ "-разрядного АЦП потребуется " $n$ " таких шагов. Как правило, цифровой выход в параллельном коде (все разряды сразу по " $n$ " отдельным линиям. АЦП с последовательным приближением являются сравнительно точными и быстрыми (и требуют " $n$ "-установок на ЦАП для обеспечения " $n$ "-разрядной точности)).

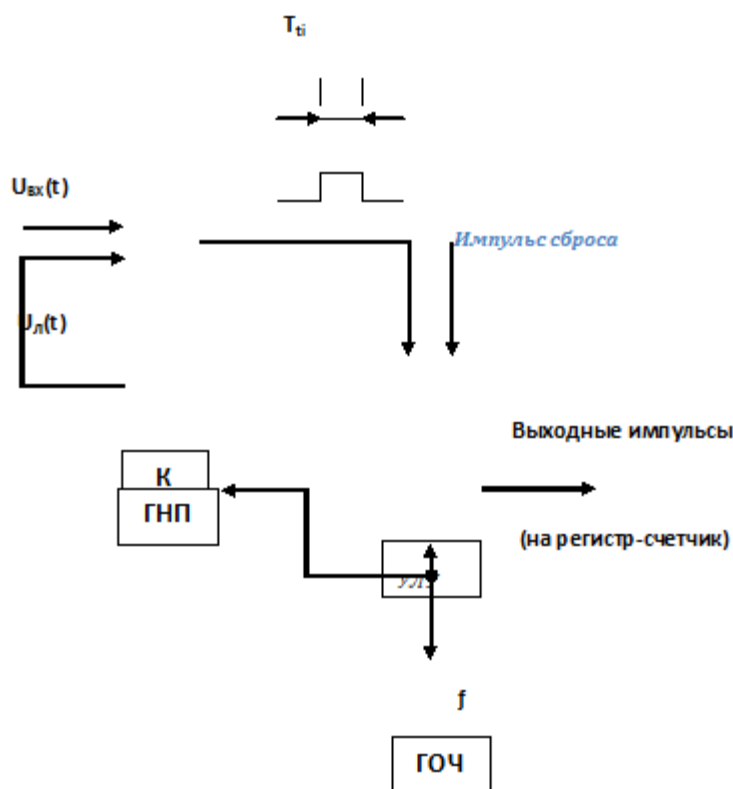
Время преобразования  $1 \text{ мкс} \div 50 \text{ мкс}$  при точности от 8 до 12 разрядов. Цена  $10 \div 400 \$$ .

(Во входном сигнале не должно быть коротких «выбросов»).

В зависимости от вида промежуточного сигнала преобразования АЦП классифицируют на типы:

1. Аналог – временной интервал – код (временной импульсный метод)
2. Аналог – частота – код (частотно-импульсный метод).

Функциональная схема АЦП типа аналог – временной интервал – код:



Аналоговое входное напряжение  $U_{\text{вх}}(t)$ , соответствующее моменту времени  $t_i$ , сначала преобразуется в импульс с длительностью  $T_{\text{и}}$ , пропорциональной значению входного напряжения, а затем – в унитарный код.

В схеме происходит сравнение входного напряжения  $U_{\text{вх}}(t)$  с линейно-нарастающим напряжением  $U_{\text{л}}(t)$ , формируемым схемой генератора пилообразного напряжения (ГНП), синхронизированного генератором импульсов опорной частоты  $f$  (ГОЧ).

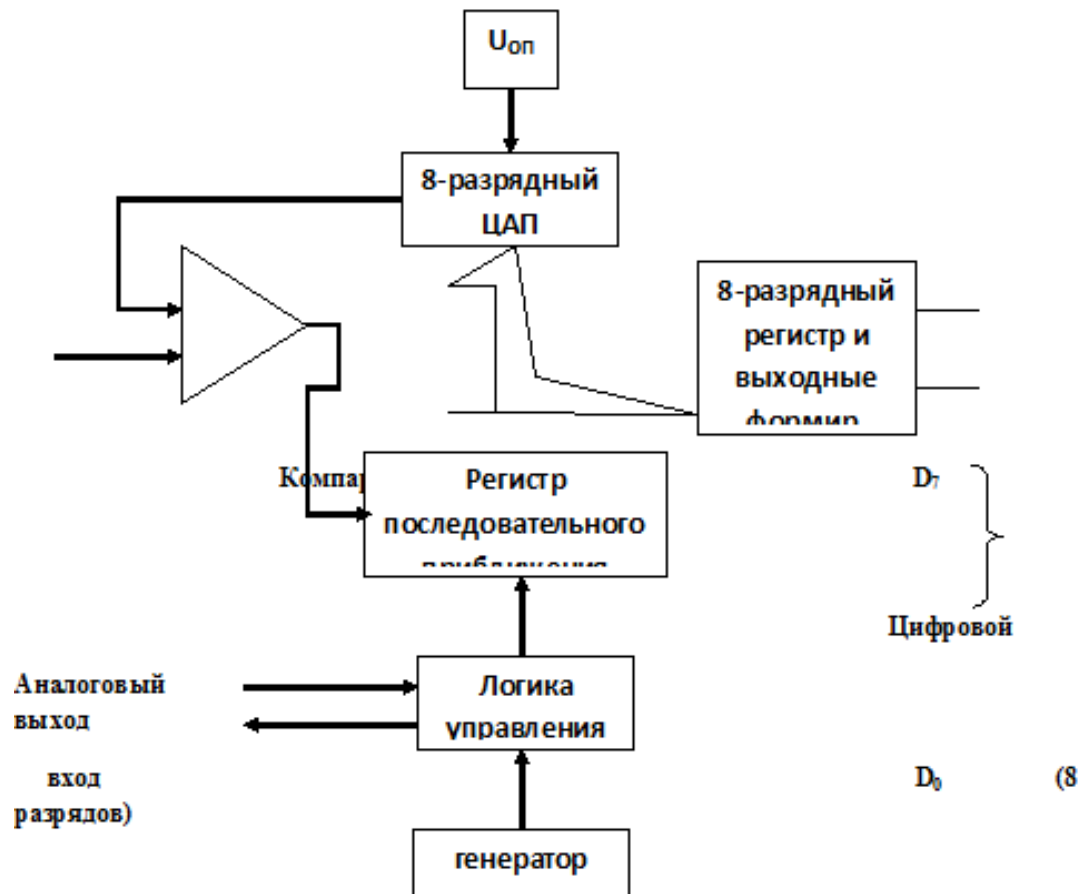
Сравнение напряжений  $U_{\text{вх}}(t)$  с  $U_{\text{л}}(t)$  осуществляется периодически с периодом  $T_{\text{пл}}$  пилообразного импульса на компараторе К, поэтому период квантования входного напряжения  $T_{\text{кв}} = T_{\text{пл}}$ .

Импульсы ГОЧ за интервал  $T_{\text{и}}$  пропускаются устройством логического управления (УЛУ) в регистр-счетчик.

Суммарное число импульсов, накопленное за время  $T_{\text{и}}$  представляет в цифровой форме аналоговый сигнал в момент  $t_i$ .

Максимальное время преобразования равно  $2m \cdot \tau$ , где  $m$  – требуемое число разрядов,  $\tau$  – период следования импульсов ГОЧ.

Апертурное время  $\Delta T_{\text{А}}$  также равно  $2m \cdot \tau$ . По сравнению с  $T_{\text{кв}} = 1/f$  ГОЧ время  $\Delta T_{\text{А}}$  велико, что ограничивает применение метода.



Цифро-аналоговые преобразователи преобразуют цифровой код в аналоговую величину.

Цифровой код, подлежащий преобразованию, обычно представляют в виде двоичного или двоично-десятичного кода, иногда в виде число-импульсного кода.

По характеру входного сигнала различают ЦАП параллельных и последовательных кодов.

По принципу действия ЦАП делятся на:

- замкнутые (с ОС) – более точные, но сложнее;
- разомкнутые (без ОС).

Замкнутые обычно применяют для преобразования цифровых кодов в перемещение, разомкнутые преобразуют коды в напряжение (ток).

В зависимости от вида выходного сигнала ЦАП разделяют на:

1. Преобразователи кода в напряжение или ток:
  - 1.1. с суммированием на пассивных элементах;
  - 1.2. с суммированием на решающих элементах (резисторах);
2. Преобразователи кода во временной интервал:
  - 1.3. нециклические;
  - 1.4. циклические;
3. Преобразователи кода в перемещение:
  - 1.5. без ОС;
  - 1.6. с ОС ;
  - 1.7. с амплитудным преобразованием сигнала рассогласования;
  - 1.8. с преобразованием сигнала рассогласования во временной интервал.



## Преобразователи кода в напряжение или ток

В напряжение –  $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{н}}$  выбирают в зависимости от того, какое устройство является нагрузкой

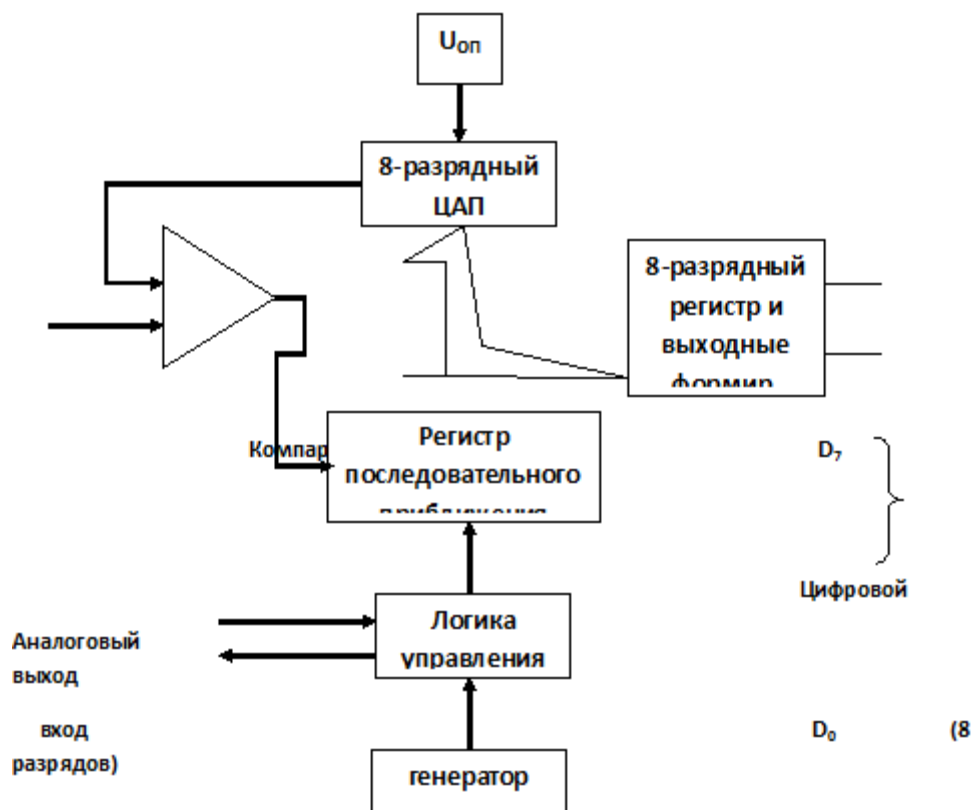
В ток –  $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$  (управляемое напряжением или током).

Работа таких преобразователей основана на суммировании эталонных величин напряжений или токов соответственно входному коду.

Суммирование может осуществляться параллельно во времени (одновременно всех слагаемых) или последовательно (в этом случае требуются запоминающие устройства).

Наибольшее распространение получили преобразователи с параллельным суммированием слагаемых – высокая точность и стабильность преобразования.

### Преобразователи кода в напряжение с суммированием на пассивных элементах



Старшинство разрядов учитывается сопротивлениями резисторов, которые подобраны по двоичному принципу:

$$R_1 = R'_1 = 2^0 \cdot R_0 = R_0$$

$$R_2 = R'_2 = 2^1 \cdot R_0$$

$$R_3 = R'_3 = 2^2 \cdot R_0$$

...

$$R_n = R'_n = 2^{n-1} \cdot R_0$$

Преобразованный сигнал в виде параллельного двоичного кода  $a_n \dots a_3 a_2 a_1$  поступает на обмотки реле  $P_n \dots P_3, P_2, P_1$ . Каждое реле срабатывает при единичном "1" сигнале данного разряда, либо остается в исходном состоянии – при "0" сигнале.

Соответственно этому воздействию в цепь вводятся резисторы из ряда  $R_1, R_2 \dots R_n$  и выводятся из ряда  $R_1, R_2 \dots R_n$ .

Величина выходного напряжения на  $R_n$ : по теории об эквивалентном генераторе.

При достаточно большом  $R_n$  можно считать:

$$\delta_{H_{max}} \approx 0,15 \cdot \frac{(2^n - 1) \cdot R_0}{R_H}$$

где  $a_i$  – значение  $i$ -го разряда преобразуемого кода (может быть либо "0" либо "1").

Преобразование в общем случае не является линейным. Для его линеаризации необходимо выполнение условия:

$$U_{вых} = - \sum_{i=1}^n \frac{R_{oc}}{R_i} E_i \cdot a_i$$

Максимальная погрешность от несоблюдения этого условия вычисляется:

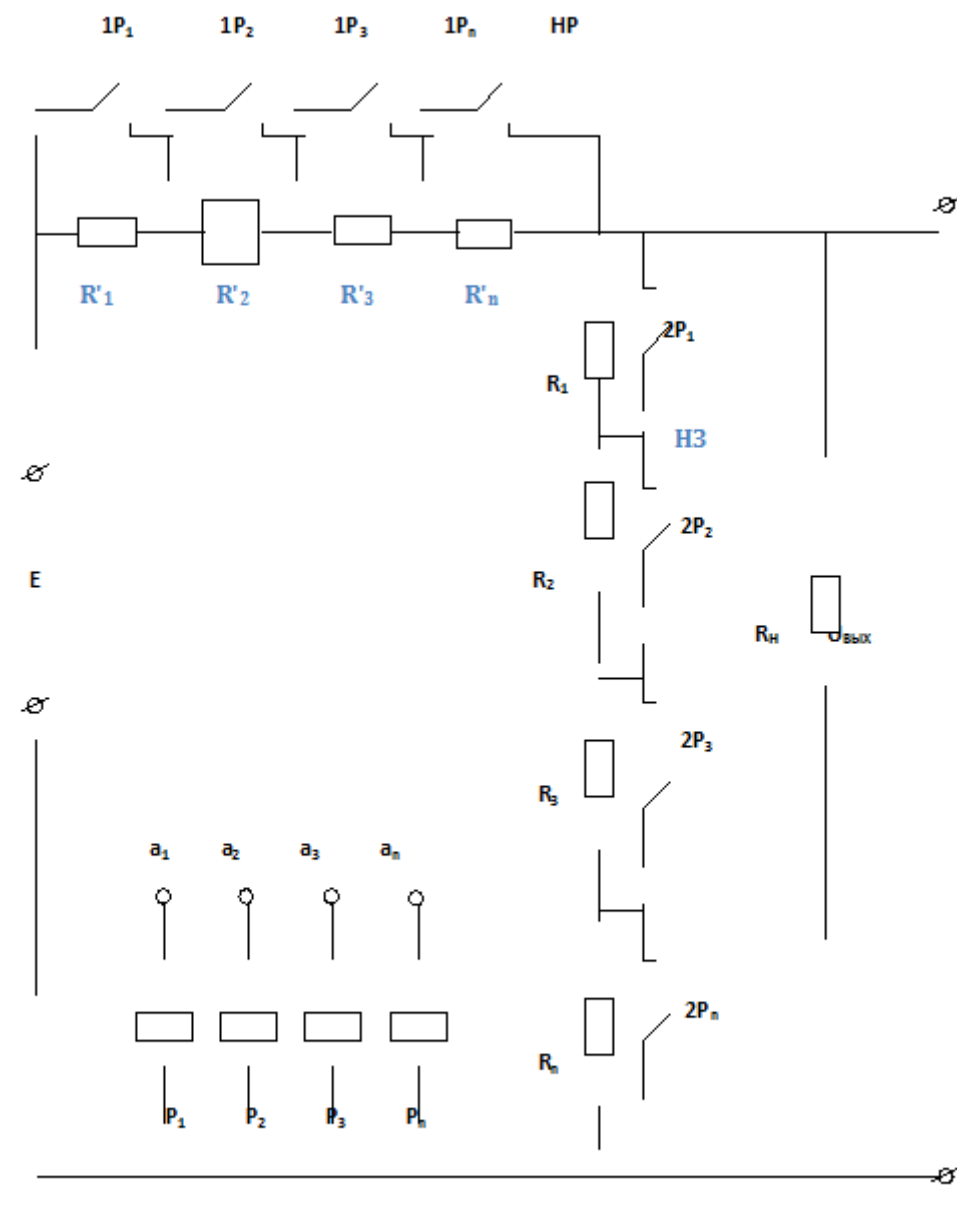
$$U_{вых} = \frac{U_{xx}}{R_{K3}} R_H$$

Достоинство схемы – постоянство нагрузки источника эталонного питания  $E$  при  $R_n \rightarrow \infty$ .

Недостатки – зависимость  $U_{вых}$  от  $R_n$ .

Если  $R_n$  мало, используют преобразователь с параллельным делителем напряжения.

## Преобразователи кода в напряжение с суммированием на решающих (ОУ) усилителях:



Под воздействием двоичного кода  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$  (0 или 1) соответственно ключи  $K_1, K_2, \dots, K_n$  будут либо открыты, либо закрыты.

Данная схема может быть реализована одним из 3-х способов:

**Способ 1:** эталонные напряжения подобраны по двоичному принципу:

$$E_1 = E_0$$

$$E_2 = 2 \cdot E_0$$

$$E_3 = 2^2 \cdot E_0$$

...

$$E_n = 2^{n-1} \cdot E_0$$

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_0$$

$$U_{\text{вых}} = - \frac{E_0 \cdot R_{\text{ос}}}{R_0} \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot a_i$$

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n = E_0$$

$$R_1 = R_0$$

$$R_2 = 2^{-1} \cdot R_0$$

$$R_3 = 2^{-2} \cdot R_0$$

$$R_n = 2^{-(n-1)} \cdot R_0$$

$$U_{\text{вых}} = - \frac{E_0 \cdot R_{\text{ос}}}{R_0} \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot a_i$$

А номиналы резисторов равны:

В этом случае:

$$R_1 = R_{\text{ос}}$$

$$R_2 = 2R_{\text{ос}}$$

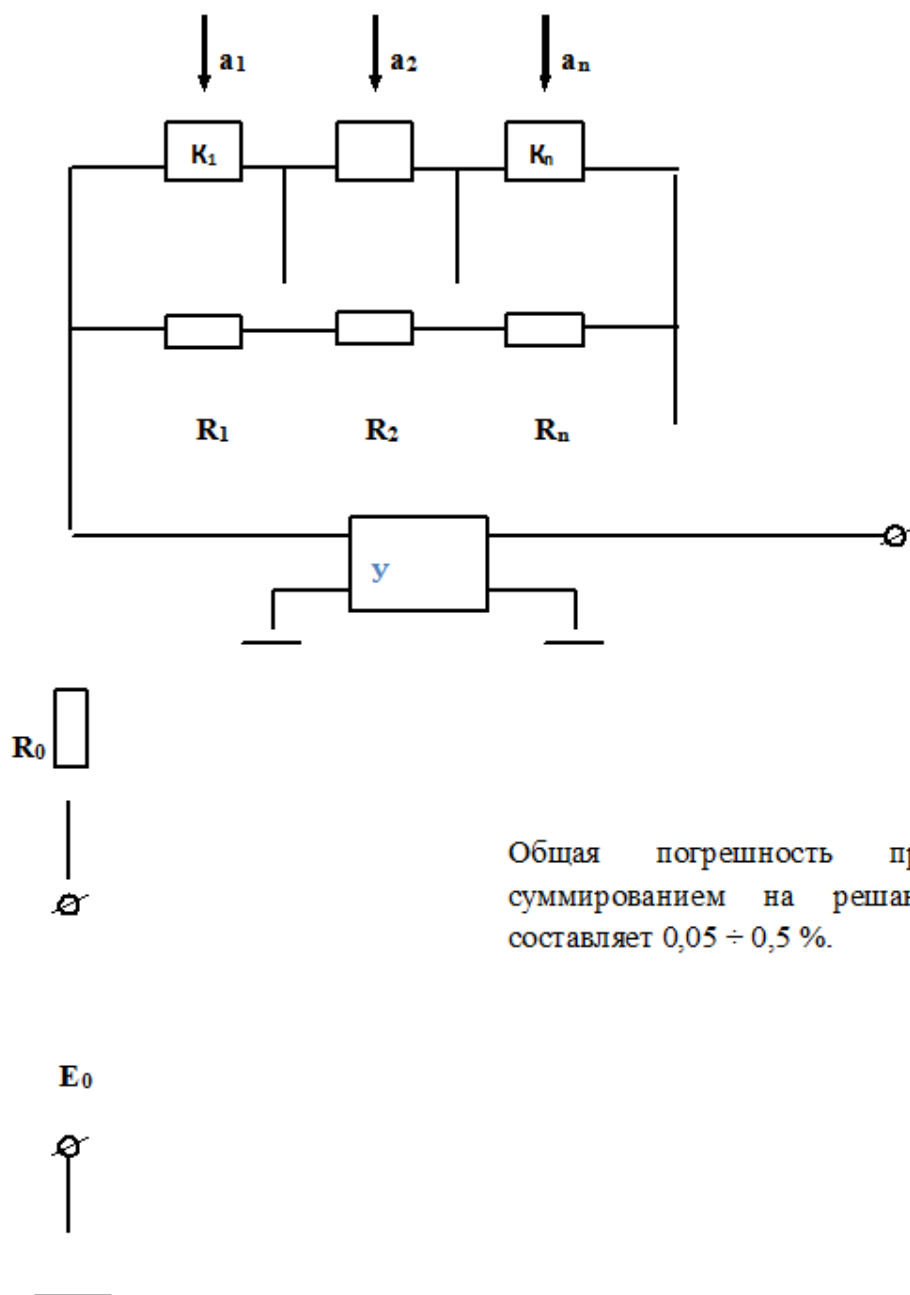
$$R_n = 2^{(n-1)} \cdot R_{\text{ос}}$$

Схема осуществляет линейное преобразование кода в напряжение.

**Способ 2:** эталонные напряжения равны:

Номиналы резисторов:

**Способ 3:** схема имеет одно эталонное напряжение  $E_0$  и один резистор  $R_0$ , а в ОС включена последовательная цепочка резисторов: (которые шунтируются ключами).



### Преобразователи кода во временной интервал

Преобразователи кода во временной интервал по принципу действия делятся на преобразователи со счетчиком и с элементами задержки.

Среди преобразователей со счетчиком различают преобразователи, в которых преобразуемый код записывается предварительно в счетчик и с его помощью преобразуется во временной интервал, и преобразователи, в которых временной интервал определяется сравнением преобразуемого кода с выходным кодом счетчика.

Преобразователи кода во временной интервал с элементами задержки делятся на преобразователи с непосредственным преобразованием кода во временной интервал и преобразователи с промежуточным преобразованием.

В одном из вариантов преобразователей с непосредственным преобразованием используются элементы задержки с учетом веса разрядов преобразуемого кода. Эти схемы содержат логическое устройство, которое соединяет последовательно те элементы задержки, которые соответствуют единичным значениям разрядов преобразуемого кода. Число элементов задержки выбирают равным числу разрядов  $n$ . Таким образом, входной сигнал, поступая на первый элемент задержки, появляется на выходе последнего элемента задержки через время:

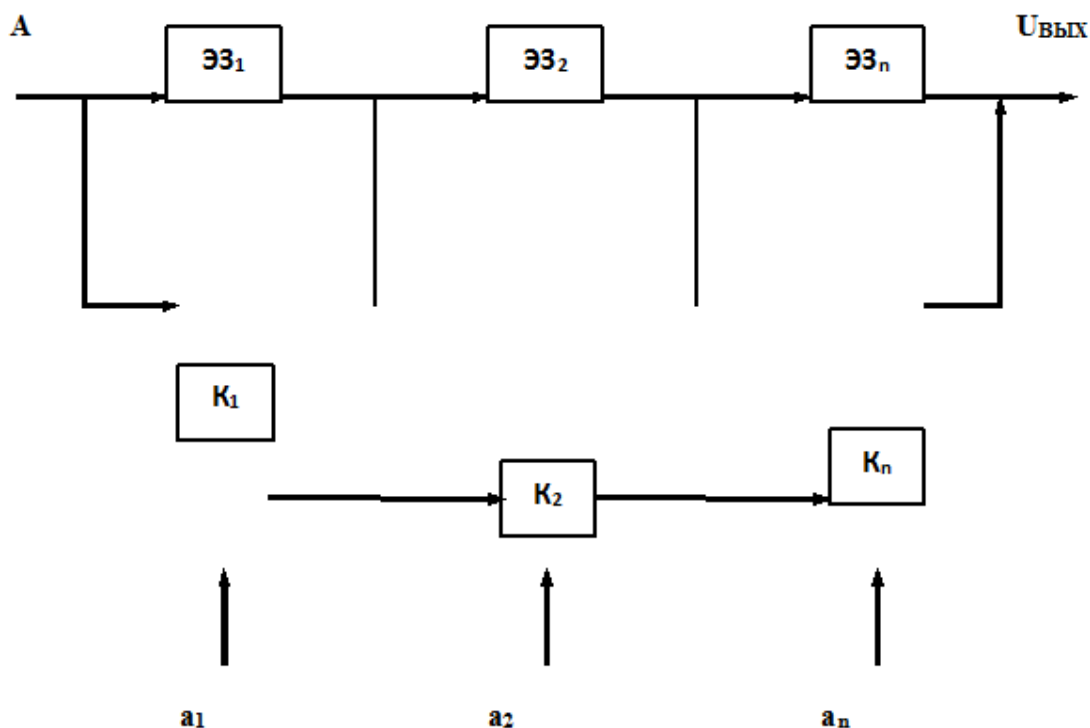
$$t_{\text{сблх}} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \tau_i$$

$$\tau_i = 2^{i-1} \cdot \tau_1$$

$$\tau_1$$

- время задержки элемента  $i$ -го разряда,
- время задержки элемента младшего (1-го) разряда.

Структурная схема преобразователя кода во временной интервал с элементами задержки, учитывающими вес разрядов:



ЭЗ – элемент задержки.

К – ключ, управляемый сигналом преобразуемого кода.

Если К включен ( $R_i$  мало), если управляющий сигнал "0". Если ( $R_i \rightarrow \infty$ ) "1".

Таким образом импульс, поступивший на вход **A**, проходит только через те элементы задержки, которые соответствуют единичным разрядам преобразуемого кода.

### Реле и переключающие устройства в системах управления

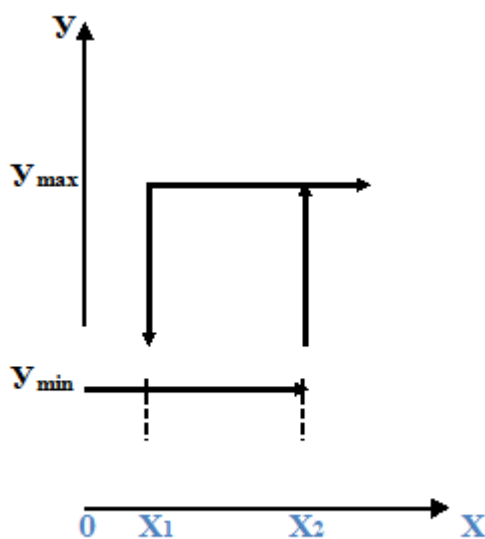
К релейным элементам автоматики (реле) относятся устройства, преобразующие плавное изменение входной величины в скачкообразное изменение выходной величины.

Реле используются в качестве элементов управления и защиты, дискретных датчиков и усилителей, размножителей сигналов и логических элементов. Реле классифицируют:

1. По виду физических величин, поступающих на их вход
  - a. электрические;
  - b. неэлектрические.
2. По назначению
  - a. управление;
  - b. защита;
  - c. сигнализация;
  - d. связь и т.д.
3. По принципу воздействия на выходную цепь
  - a. контактные;
  - b. бесконтактные.
4. По роду величины, на которую реагирует реле
  - a. ток;
  - b. напряжение;
  - c. мощность;
  - d. частота и т.д.
5. По исполнению
  - a. открытые;
  - b. с защитным чехлом (кожухом);
  - c. пылебрызгозащищенные;
  - d. герметические.

Из электрических реле в современных дискретных системах автоматики широко используют электромеханические (контактные), магнитные и полупроводниковые. В контактных реле скачкообразное изменение выходной величины достигается замыканием или размыканием выходной цепи, в бесконтактных – путем резкого изменения параметров выходной цепи ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ). Основные характеристики реле:

Статическая (характеристика управления) – зависимость выходной величины  $Y$  от входной  $X$ . Для большинства реле характерным является наличие гистерезисной петли, например, вида:



Характеристика двухпозиционного нейтрального реле (не реагирующего на знак X).

$X_1$  – параметр срабатывания

$X_2$  – параметр отпускания

1. Мощность срабатывания  $P_{срб}$  – минимальная мощность, потребляемая катушкой реле при срабатывании.
2. Выходная (коммутируемая) мощность  $P_{вых}$  – произведение максимального отключаемого тока на напряжение источника питания выходной цепи.
3. Время срабатывания  $t_{срб}$  – время от подачи на вход реле управляющего сигнала до появления (исчезновения) сигнала на выходе (замыкание и размыкание выходных контактов).
4. Время отпускания  $t_{отп}$  – время от момента снятия входного сигнала до размыкания (замыкания) выходной цепи.
  - время трогания.
  - время движения.

$$t_{отп} = t_{тр} + t_{дв}$$

$$t_{тр}$$

$$t_{дв}$$

5. Коэффициент возврата  $K_{взв}$  – отношение параметра отпускания реле к параметру срабатывания.  $K_{взв}$  характеризует относительную ширину релейной петли статической характеристики.

$$K_{взв} = \frac{X_{отп}}{X_{срб}} < 1$$

6. Коэффициент запаса  $K_{зап}$  – отношение МДС (магнитодвижущей силы) катушки реле при установившемся режиме к МДС при токе срабатывания  $w$  – число витков.

$$K_{зап} = \frac{I_{уст} \cdot w}{I_{срб} \cdot w}$$

7. Коэффициент управления (усиления)  $K_y$  – отношение максимального значения выходного сигнала к входному при срабатывании.

$$K_y = \frac{y_{max}}{X_{срб}}$$

### Электромеханические реле

Особенностью электромеханических реле является наличие подвижной системы. По принципу действия электромеханические реле можно классифицировать:

1. Электромагнитные
  - а. постоянного тока (нейтральные и поляризованные)
  - б. переменного тока.
2. Магнитоэлектрические
3. Электродинамические
4. Индукционные
5. Тепловые



## Электромагнитные реле постоянного тока

Электромагнитные реле постоянного тока могут быть:

- с поворотным якорем (клапанного типа),
- с втягивающимся якорем (соленоидного типа).

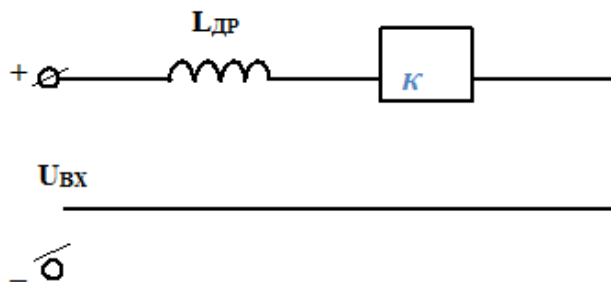
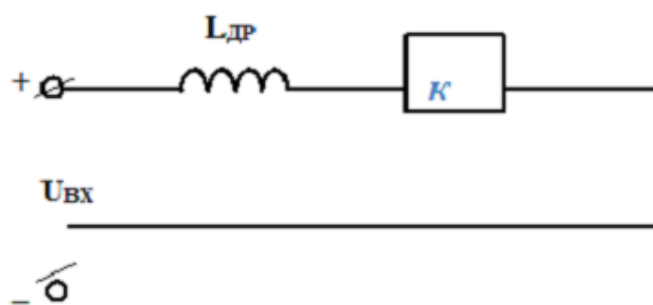
Состоят из электромагнита (сердечник с подвижным якорем и катушка), контактных групп, пружин. Принцип действия основан на взаимодействии магнитного потока, создаваемого электрическим током в катушке, с подвижным якорем. При наличии сигнала на входе  $U_{вх}$ , возникающий в катушке реле ток создает в магнитопроводе магнитное поле, намагничивающее подвижный якорь. Возникающие при этом электромагнитные силы преодолевают действие пружин, обеспечивая поворот или втягивание якоря и переключение состояния контактов. При перемещении якоря реле электромагнитной (тяговой) силой  $F_{\Phi}$  совершается работа за счет энергии, занесенной в магнитном поле электромагнита. Уравнение электрического равновесия при включении катушки реле на постоянное напряжение:

$$U = i \cdot R + w \cdot \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)$$

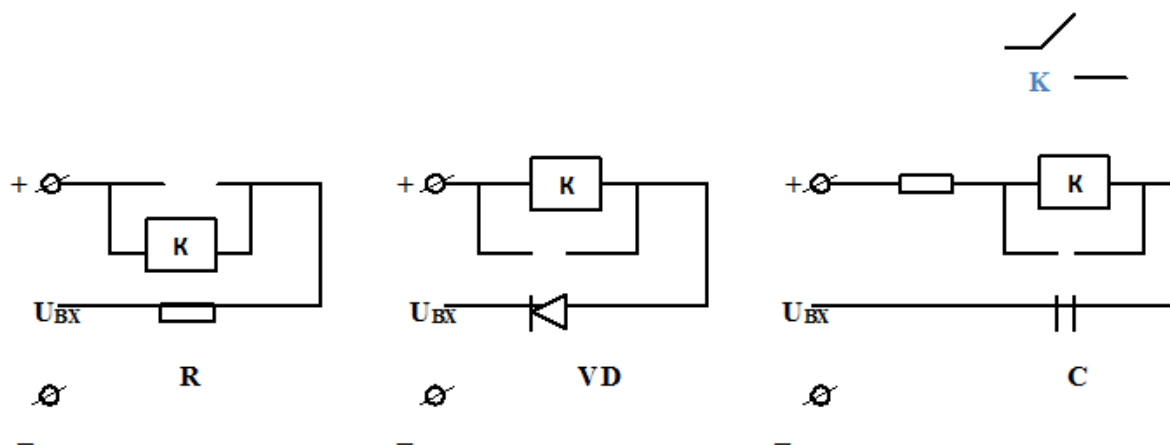
где  $U$ ,  $i$  – напряжение и ток катушки реле;  $R$ ,  $w$  – сопротивление и число витков катушки;  $\Phi$  – магнитный поток в магнитопроводе реле.

При необходимости время срабатывания и отпускания реле можно изменить.

1. Для ускорения срабатывания уменьшают постоянную времени  $T = L / R$  (последовательно с катушкой реле включают  $R_{доб}$ , увеличивая при этом напряжение питания).
2. Для задержки срабатывания реле увеличивают  $F_{мех}$  (пружины),  $\delta$  (зазор) и  $T = (L + L_{др}) / R$  (последовательно с катушкой реле включают дроссель с индуктивностью  $L_{др}$ . При этом нарастание магнитного потока реле замедляется, время трогания  $t_{тр}$  увеличивается и, следовательно, задержится появление сигнала на выходе реле.

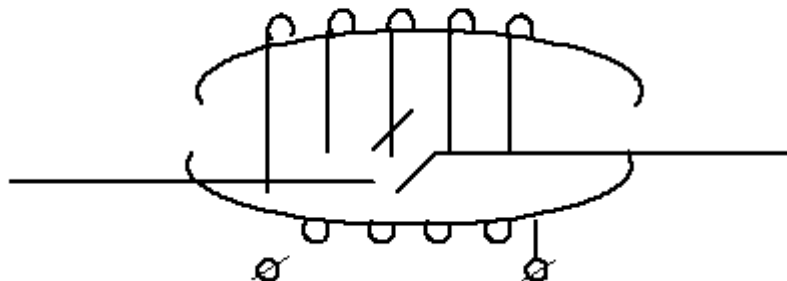


# 1. Для увеличения времени отпущения



## Реле с магнитоуправляемыми контактами (герконы).

Реле с магнитоуправляемыми контактами представляет собой стеклянную ампулу, заполненную инертным газом (азот, аргон) (или вакуум), в которую впаяны тонкие упругие ферромагнитные пластины, выполняющие роль и контактов, и упругих элементов, и части магнитопровода. При подаче сигнала на вход реле, ток, протекающий в катушке, создает магнитный поток, замыкающийся внутри катушки по ферромагнитным пластинам.



Пластины намагничиваются, возникают силы притяжения

Герконы обладают:

1. Большим сроком службы с числом срабатываний до  $10^6 \div 10^9$ . (реле РЭС-10 – число срабатываний до  $10^5$ ).
2. Малой инерционностью (малый зазор, масса) –  $t_{срб} = 0,5 \div 2$  мс. (РЭС-10  $t_{срб} = 8$  мс, др. до 60 мс).

Управление может осуществляться с помощью постоянных магнитов.

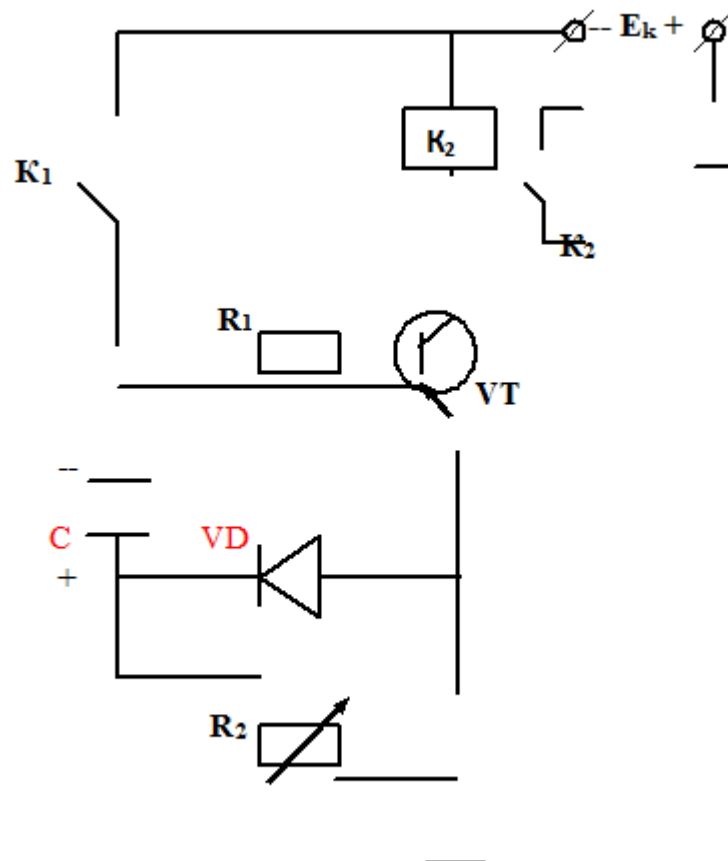
Выходные токи  $0,5 \div 1$  А., напряжение  $30 \div 60$  В и более, ход контактов  $50 \div 500$  мкм, пробивное напряжение до 1000 В.

Напряжение, подаваемое на катушку обычно 12 или 24 В, потребляемая мощность  $0,4 \div 2,4$  Вт.

Реле промежуточные, коммутирующее напряжение  $0,05 \div 220$  В типа РПГ, РПГ-2 масса  $100 \div 250$  г (с катушкой).

## Поляризованные электромагнитные реле

Поляризованные электромагнитные реле являются разновидностью электромагнитных реле постоянного тока, реагирующих на величину и знак входного сигнала. В магнитной цепи этих реле наряду с рабочим потоком  $\Phi_R$  действует специальный подмагничивающий (поляризующий) магнитный поток  $\Phi_P$ . Реле времени – тепловые, моторные, электронные и другие. Электронные (полупроводниковые) реле времени – обычно это устлитель с RC цепью на входе, и реле (электромагнитные) – на выходе. Существуют много схем на постоянном и переменном токе, использующих заряд или разряд конденсатора.



Задержка выходного сигнала после снятия входного от долей секунд до десятков минут. Если входной сигнал отсутствует ( $K_1$  разомкнут), транзистор  $VT$  заперт → реле  $K_2$  обесточено, контакт  $K_2$  – разомкнут. После подачи входного сигнала ( $K_1$  замкнут), минус подается на базу  $VT$ , он открывается,  $I_k$  срабатывает  $K_2$ . При этом заряжается конденсатор  $C$  через  $VD$  до  $E_k$ . При снятии входного сигнала ( $K_1$  разомкнут) транзистор некоторое время остается открытым, т.к. заряжен был конденсатор  $C$ . Разряд  $C$  через  $R_2$ , переход эмиттер-база,  $R_1$ . После разряда  $C$ ,  $VT$  закрывается, реле  $K_2$  в исходном состоянии, т.е. контакт  $K_2$  разомкнут.

Время задержки регулируется резистором  $R_2$ , конденсатором  $C$ . Серийно выпускается реле времени ВЛ-29: выдержка регулируется от 0,1 до 10 мин., число ступеней 100. возможна коммутация цепей постоянного тока:  $12 \div 220$  В,  $P_{\text{вых}} = 25$  Вт. переменного тока:  $12 \div 380$  В,  $P_{\text{вых}} = 250$  В А ( $\cos \varphi = 0,4$ ).

Назначение: создание определенных задержек в передаче сигналов; периодическое включение и отключение электрических цепей при работе в циклическом режиме.

Использование стабилизаторов напряжения существенно повышает точность и надежность работы реле.

### **Моторные реле времени**

Моторные реле времени обеспечивают получение различных регулируемых выдержек времени по нескольким выходным цепям, что позволяет использовать их при программном управлении. Привод таких реле – синхронный (или другой маломощный) электрический двигатель, редуктор, сцепление (муфта) с электромагнитным приводом, кулачковый вал. Кулачки переключают выходные контакты через определенные, заранее установленные промежутки времени. Регулирование выдержки: изменением передаточного числа редуктора; положением кулачков. Программные реле времени ВС-10: пределы выдержек  $2 \div 60$  сек (ВС-10-31),  $15 \text{ сек} \div 9 \text{ мин}$  (ВС-10-34),  $1 \div 24$  час (ВС-10-38), число выходных цепей: 3 или 6.

Более совершенными устройствами для осуществления программ управления периодическими технологическими процессами являются командные электропневматические приборы (КЭП), например, КЭП-12у (может управлять 12 электрическими или пневматическими цепями).

### **Путевые переключающие устройства**

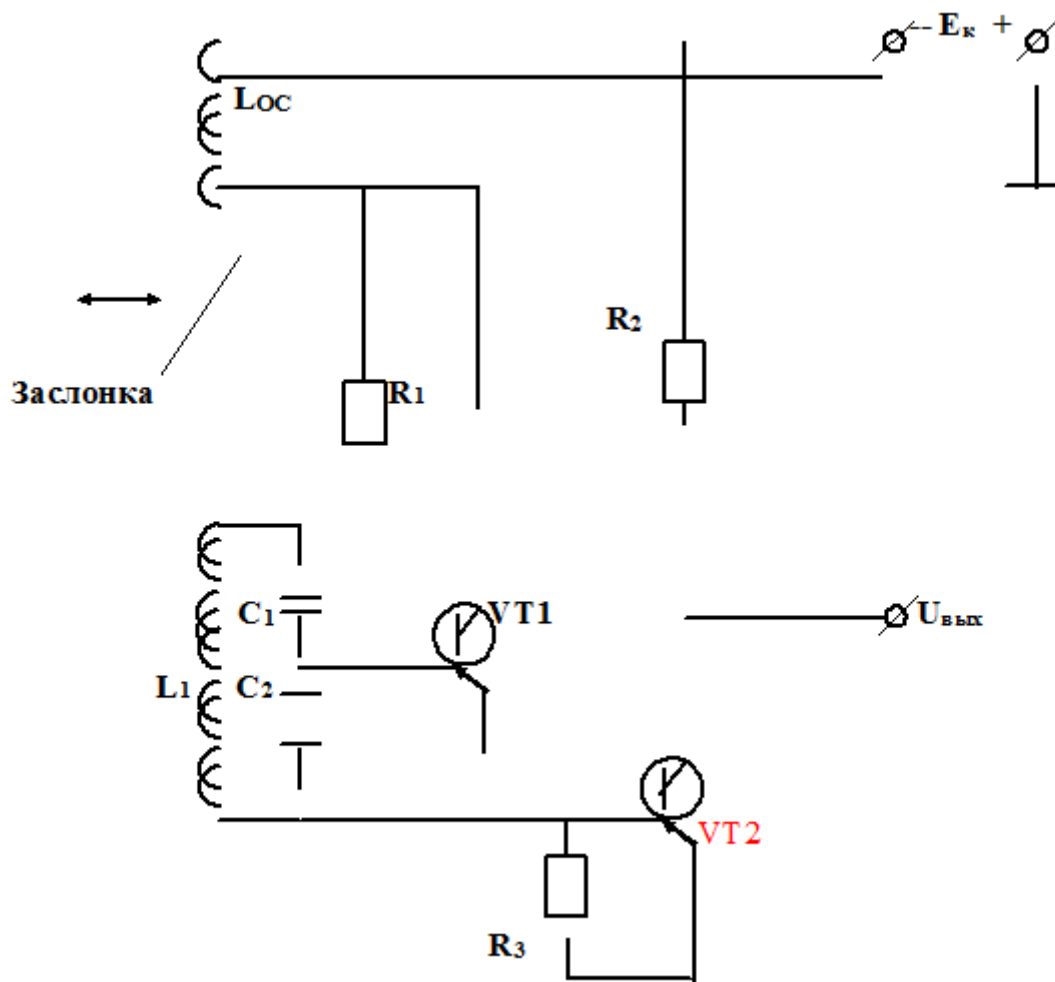
Путевые переключающие устройства используют при автоматизации процессов, связанных с перемещениями механизмов или объектов обработки. Бывают: контактные механические; бесконтактные индуктивного и трансформаторного типов; магнитомодуляционные.

#### **Контактные механические переключающие устройства**

Контактные механические переключающие устройства бывают однопредельные и многопредельные (т.е. содержат одну или несколько пар рабочих контактов). Путевое переключающее устройство, действующее только в конце пути, т.е. ограничивающее путь передвижения механизма путем размыкания цепи электрического привода называется конечным выключателем. В сложных системах управления электропроводами применяют универсальные переключатели серии УП, обеспечивающие возможность нескольких переключений. Их выполняют обычно в виде набора контактных устройств, в которых неподвижные контакты укреплены на рычагах, управляемых кулачками. Могут управлять током до 20А при напряжении до 500В. Допускают комплектование в одном переключателе до 16 секций с соответствующим числом переключаемых цепей управления. Недостаток – износ контактов (желательно, чтобы напряжение было меньше либо равно  $100 \div 250 \text{ В}$ ).

#### **Бесконтактные переключающие устройства**

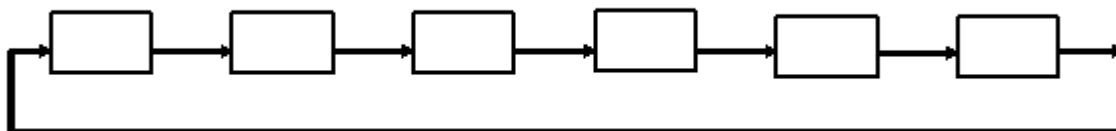
Бесконтактные переключающие устройства надежнее контактных, особенно при большой частоте переключений. Наиболее часто на основе использования фотоэлементов и индуктивных датчиков. Схема бесконтактного переключающего устройства на основе индуктивного генераторного датчика положения.



Транзисторный генератор колебаний, амплитуда колебаний которой управляется с помощью подвижной металлической заслонки (между катушкой колебательного контура и катушкой ОС). При отсутствии заслонки – генерация,  $VT2$  усилитель выходного сигнала. При вводе заслонки – ОС нарушается, генерация срывается,  $VT2$  закрывается. На таком принципе построены бесконтактные выключающие устройства типа КВД, БК (напряжение их питания: 12 В (или 24 В) +10%, - 15%, ширина щели: 3 мм (или 6 мм)).

### Магнитомодуляционные переключающие устройства

Эти устройства характеризуются наличием чувствительного элемента магнитомодуляционного типа, реагирующего на изменение магнитного поля (элемент Хола, герметичные магнитоуправляемые контакты (герконы), феррозонды). В магнитомодуляционных путевых переключателях сигнал о положении объекта формируется без механического и электрического контакта с ним. Структура схема магнитомодуляционного переключающего устройства.



**УЭ** – управляющий элемент (магнит, катушка электромагнита).

**ЧЭ** – чувствительный элемент

**КЭ** – коммутирующий элемент

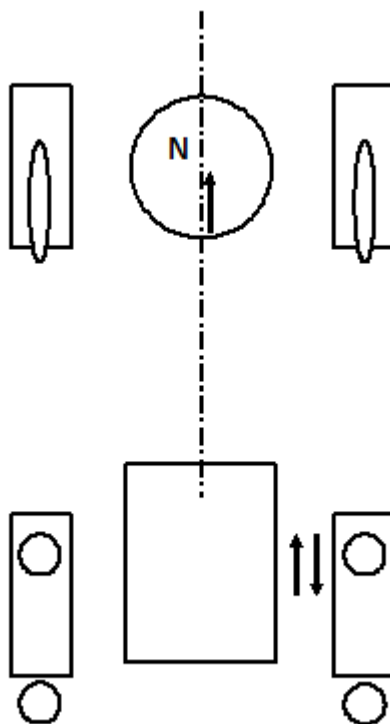
**ИЭ** – исполнительный элемент (реле, магнит или полупроводниковые усилители)

**ПД** – исполнительный двигатель.

Управляющий элемент жестко связан с перемещением объекта управления. При достижении **ОУ** заданного положения **УЭ** вырабатывает управляющее воздействие, которое поступает на чувствительный элемент. В **ЧЭ** перемещение в виде сигнала **УЭ** преобразуется в изменение какого-либо параметра – электрического (индуктивного) или магнитного (магнитной проницаемости). После **ЧЭ** действует коммутирующий элемент, предназначенный для преобразования непрерывного изменения индуктивности обмотки **ЧЭ** в дискретные изменения тока или напряжения. Исполнительный элемент непосредственно коммутирует цепи управления исполнительного двигателя с целью его останова, реверса, переключения на другую скорость и т.д.

Путевые переключатели на магнитоуправляемых контактах (герконах). Наиболее часто используют в путевых переключателях со сложными логическими зависимостями. Контактную группу МК обычно включают в цепь управления многоконтактного реле или контактора.

Вариант схемного исполнения путевого переключателя на МК:



## Взаимное расположение герконов и якоря

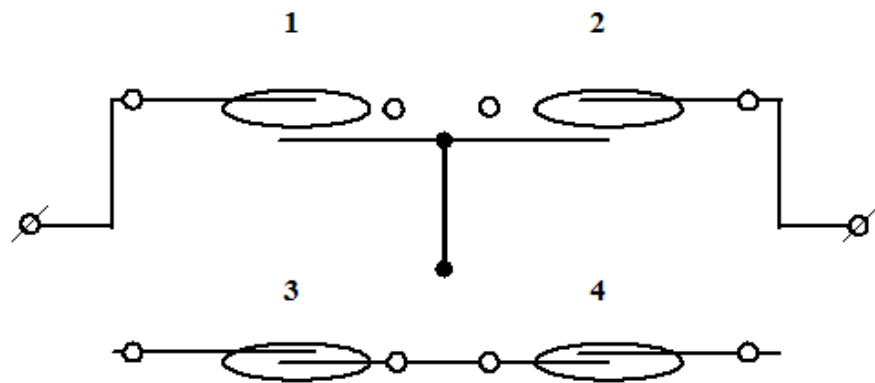
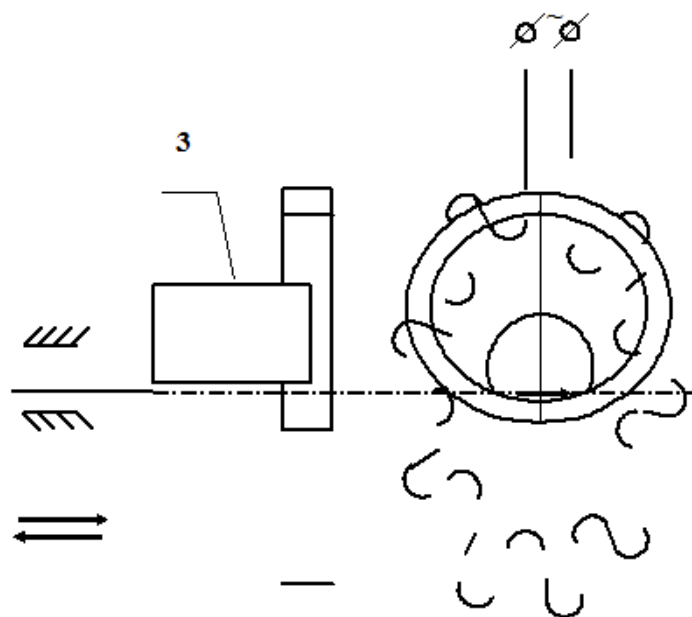


Схема подключения герконов

Данный переключатель содержит 4 МК (1 ÷ 4), соединение последовательно-параллельное, что позволяет дублировать каждый контакт в случае его несрабатывания или залипания. Управление осуществляется поворотом якоря (постоянным магнитом) относительно собственной оси. Взаимное расположение МК и якоря выбирают таким, чтобы нейтраль якоря была перпендикулярна оси МК и контактные пластины находились в зоне максимального магнитного потока. При повороте якоря относительно собственной оси поток в зоне расположения МК уменьшается. Работоспособность такого переключателя обеспечивается при повороте якоря на угол до  $20^\circ$  от нейтрали. Примером такого переключателя на МК является переключатель типа КЭМ-2, используется в цепях постоянного тока с напряжением 30 В и током до 0,25 А. Бесконтактные магнитомодуляционные путевые переключатели (БМПП). Бесконтактные магнитомодуляционные путевые переключатели (БМПП) используют чувствительный элемент, построенный по принципу феррозонда. Например: чувствительный элемент содержит магнитопровод в форме тороидального сердечника 1 с равномерно распределенной обмоткой 2; управляется якорем – постоянным магнитом 3 цилиндрической формы, намагниченным по диаметру.



Направление переменного тока, приложенного к обмотке 2, такое, что сердечник при удалении от якоря не насыщается и его магнитная проницаемость будет максимальной, что определяет максимальное значение индуктивности обмотки. Принцип магнитной модуляции проявляется здесь в модуляции электрического сопротивления обмотки магнитным полем перемещающегося якоря. При приближении якоря создаваемый им магнитный поток подмагничивает сердечник до состояния насыщения, что вызывает резкое уменьшение магнитной проницаемости сердечника и индуктивности обмотки. Схемы БМПП характеризуются простотой, надежностью, мощными выходными сигналами, точностью:

$$\eta = 0,6 \div 0,85$$

$\cos \varphi = 0,5 \div 0,45$  коэффициент мощности

Время срабатывания  $t_{срб} = 50 \div 300$  мс

Диапазон рабочих температур –  $60 \div +115^{\circ}\text{C}$

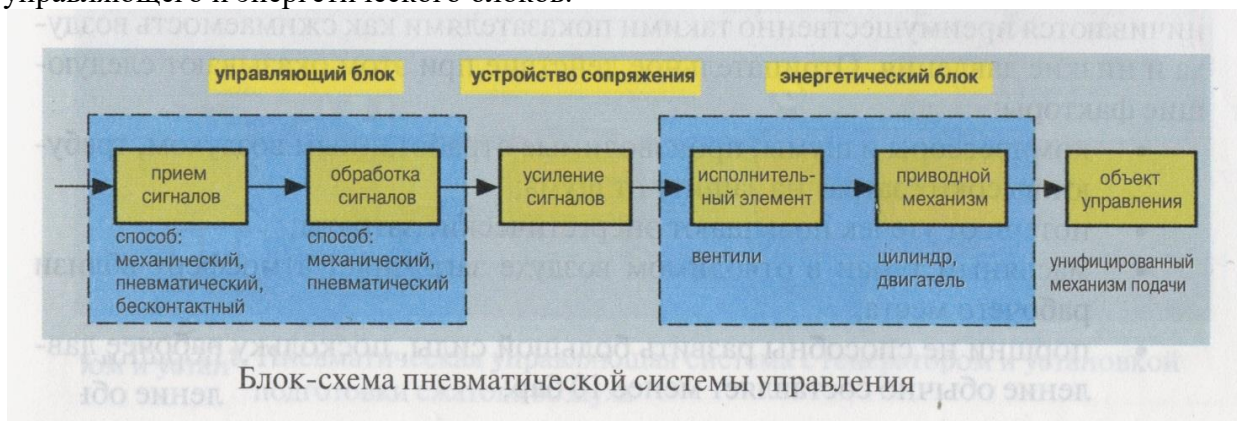
Допустимые вибрации в диапазоне  $5 \div 600$  Гц

Срок службы  $(25 \div 30) \cdot 10^3$  час

Для обеспечения постоянства параметров необходима стабильность частоты питающего напряжения и его величины.

### Типовые пневматические средства автоматизации

Пневматика в своём обобщенном значении подразумевает техническое применение сжатого воздуха, при этом чаще используется избыточное давление, но иногда и давление ниже номинального (вакуум). Пневматические системы управления состоят из управляющего и энергетического блоков.



Области применения пневматических систем управления:

- ротационные приводы (пневматические двигатели) для сверления, привинчивания, шлифования;
- линейные приводы (пневматические цилиндры) для загрузки, зажима, смещения, выталкивания;
- ударные приводы для резки, штамповки, клёпки, прессования;
- сопла для продувки изделий и выдувания стружки;
- в технологии обработки поверхностей: пескоструйная очистка и пульверизационная окраска;
- в технике контроля линейных параметров: пневматические контрольно-измерительные устройства.

Общие сведения о пневматике и технические возможности пневматических устройств



- в пневмосистемах сжатый воздух перемещается по трубопроводам и может храниться в ресиверах (сосудах);
- передвижные компрессоры позволяют применять энергию сжатого воздуха независимо от места;
- сжатый воздух практически нечувствителен к колебаниям температуры и может использоваться во взрыво- и пожароопасных помещениях;
- скорость хода поршней пневматических цилиндров может достигать 15 м/с;
- двигатели способны функционировать со скоростью до 30 000 об./мин., а небольшие турбины – до 450 000 об./мин.;
- инструменты и приспособления могут нагружаться до полной остановки, они защищены от перегрузок и обладают высоким пусковым моментом;
- большой срок службы (до 10...20 тыс. час.), простота конструкции и обслуживания, безотказность в работе.

Возможности использования пневматических управляющих систем ограничиваются в основном такими факторами как сжимаемость воздуха и низкие давления. Пневматическая установка состоит из генератора (источник давления), системы подготовки воздуха и системы управления.

**Генератор (компрессор)** забирает воздух из атмосферы и сжимает его до требуемого давления. По способу сжатия воздуха различают поршневые компрессоры и турбокомпрессоры. Поршневые компрессоры функционируют по принципу вытеснения, т.е. воздух подсасывается в цилиндр, запирается там, сжимается и выпускается в воздухосборник. Турбокомпрессоры всасывают атмосферный воздух посредством рабочих колёс или пропеллеров и ускоряют его. В последовательно включенных ресиверах энергия воздушного потока преобразуется в энергию давления.

**Агрегат подготовки сжатого воздуха** состоит обычно из фильтра, регулятора давления и специальной маслёрки для смазки масляным туманом.

Приводные элементы преобразуют пневматическую энергию (энергию давления) в механическую энергию (энергию движения).

Существуют приводы вращательного действия без ограничения диапазона изменения угла поворота (пневмодвигатели), с ограниченным диапазоном угла поворота (поворотные двигатели, вращающиеся цилиндры) и приводы прямолинейного действия (пнеумоцилиндры).

**Пневмодвигатели** широко используются в качестве приводов для различных инструментов и подъёмных механизмов, они характеризуются небольшим весом на единицу мощности и удобством в обслуживании. Мощность, число оборотов и вращающий момент бесступенчато регулируются путём изменения рабочего давления и дросселирования расхода воздуха.

**Пневматические двигатели** делятся на поршневые, роторные (дисковые) и турбинные. Рабочая скорость поршневых двигателей достигает 6000 об./мин., роторных - до 30 000 об./мин., турбинных – до 350 000...450 000 об./мин.

**Пнеумоцилиндры** подразделяют на цилиндры одностороннего и двустороннего действия. Их используют для перемещения, подъёма и подачи заготовок и инструментов или для создания зажимных и толкающих усилий.

При проектировании пневматической системы управления разрабатывают следующие вопросы:

1. Топология переключательной схемы (отображаются конструкционные элементы без учёта их пространственного расположения, каждый конструкционный элемент снабжается заключённым в рамку условным обозначением, включающим номер установки, номер переключательного контура, название элемента и его номер).

2. Функциональные диаграммы (графически отображают последовательность функций, т.е. программу перемещений и взаимодействия конструкционных элементов).

В пневматике *распределители и регуляторы давления* действуют по принципу пропорционального регулирования, преимуществами которого по сравнению с традиционной вентильной техникой являются:

- более низкие затраты на оборудование и монтаж;
- меньшая занимаемая площадь;
- возможность дистанционного регулирования заданных параметров и др.

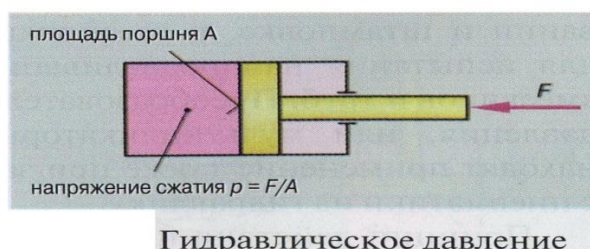
### Типовые гидравлические средства автоматизации

Широкое применение гидравлические системы нашли в тяжелом машиностроении, в производстве мощных прессов, протяжных и строгальных станков, зажимных устройств, а также автоматизации заготовительных производств, металлорежущих станков предназначенных для финишной обработки. Также гидравлические системы находят применение в авиастроении, подъёмно-транспортных, дорожно-строительных машинах и др. областях.

Основные достоинства гидравлических систем:

- высокая удельная мощность, позволяющая достаточно компактное конструктивное исполнение;
- высокие быстродействие и чувствительность;
- возможность бесступенчатого (без механического редуктора) регулирования параметров движения и передачи больших усилий;
- обеспечение надёжной защиты от перегрузок за счёт ограничения давления (предохранительные клапаны)

В гидравлических системах передача энергии осуществляется посредством жидкости (обычно минеральные масла с присадками) в неподвижном (спокойном) состоянии- гидростатика, или посредством текущей жидкости, т.е. находящейся в подвижном состоянии- гидродинамика.



**Гидростатика.** Когда на находящуюся в спокойном состоянии жидкость оказывается усилие, создаваемое поршнем, возникает давление, величина которого одинакова в любом месте системы:

$$P = \frac{F}{S}$$

где P- давление, F- сила, S- площадь поршня

**Гидродинамика.** Жидкости могут течь по трубе только при наличии разности давлений (аналогия с эл. током). В закрытой системе объёмный расход остаётся постоянным. Следовательно, Q:

$$= \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S * \Delta l}{\Delta t}$$

где:  $Q$  - объёмный расход, м;  $\Delta V$  - элемент объёма,  $\Delta t$  - отрезок времени,  $Q=S \cdot v$ ,  $S$  - площадь поперечного сечения,  $\Delta l$  - длина элемента объёма,  $v$  - скорость течения.

Жидкость вынуждена быстрее протекать в тех местах, где площадь поперечного сечения  $S$  меньше, т.е. скорости объёмного потока обратно пропорциональны поперечным сечениям:

$$Q_1 = S_1 \cdot v_1$$

$$Q_2 = S_2 \cdot v_2 \text{ и если } Q_1 = Q_2 \rightarrow$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}, \text{ где } v - \text{ скорость течения в поперечном сечении.}$$

Очевидно, что при уменьшении поперечного сечения скорость течения на этом участке возрастает. Различают ламинарный и турбулентный режимы течения. В случае медленного протекания по гладким трубам имеет место ламинарное течение. При увеличении скорости течения возникает турбулентность. Критерием оценки режима течения служит число Рейнольдса (Рейнольдс Осборн, 1842-1912, англ. физик):

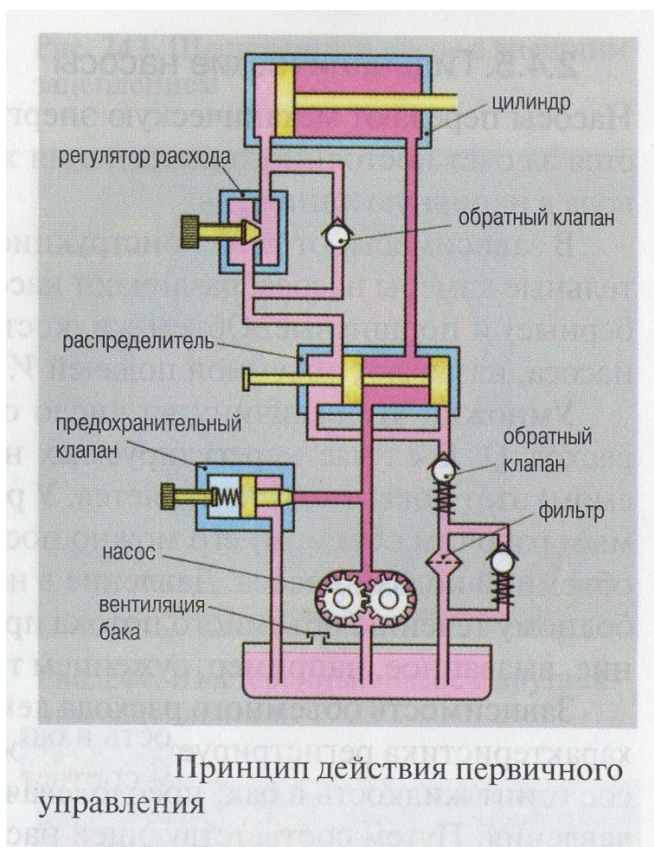
$$Re = \frac{V_m \cdot d}{\nu},$$

где:  $Re$  - число Рейнольдса,  $V_m$  - средняя скорость течения,  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $d$  - длина обтекания.

Переход от ламинарного режима течения на турбулентный наблюдается начиная с  $Re \ 2300 \div 2800$ . При очень высоких скоростях образуется кавитация, представляющая собой «разрывы» жидкости и образование большого количества мельчайших быстро растущих парогазовых пузырьков, при потере устойчивости которых, т.е. при их «захлопывании» образуются в микрообъёмах исключительно высокие давления и др. эффекты, существенно сокращающие срок службы гидроаппаратуры. Гидравлические жидкости. Их задача состоит в передаче гидравлической энергии. Требования к рабочим жидкостям на масляной основе (гидравлическим маслом): -обеспечение смазки подвижных деталей, снижение трения; -защита металлических частей от коррозии; -отвод выделяющегося тепла из рабочих агрегатов; -высокая стойкость к старению; -совместимость с материалами уплотнений.

Структура гидравлических систем управления. Основой любой гидравлической установки является циркуляционная система. Она начинается с всасывания рабочей жидкости из бака и создания насосом объёмного расхода. Если объёмному потоку противостоит определённое сопротивление- возникает давление. Далее рабочая жидкость (масло) протекает через клапаны и вентили к исполнительным агрегатам, например, рабочему цилиндру. Выполнив свою рабочую задачу масло возвращается обратно в бак.

Все включённые в контур конструкционные элементы представляют собой сопротивления, которые при протекающей рабочей жидкости преобразуют энергию давления в механическую энергию (цилиндр, двигатель) и тепловую (конструкционные элементы гидросистем действуют аналогично резисторам в электротехнике). Гидрораспределители применяют для переработки информации в целях её дальнейшего использования для управления приводами в системах автоматизации. Они служат для изменения направления потока рабочей жидкости, останавливают или пускают его в двух и более линиях. Их подразделяют на гидрораспределители с ручным, механическим, гидравлическим, электрическим и электрогидравлическим управлением. Регуляторы расхода используются для регулирования скорости. В цилиндрах или гидравлических двигателях гидравлическая энергия преобразуется в механическую энергию. Масляный фильтр в сливной линии производит очистку масла, прежде чем оно (без давления) сливается в бак. Предохранительный клапан ограничивает величину давления; при давлении выше заданного объёмный поток отводится в бак.



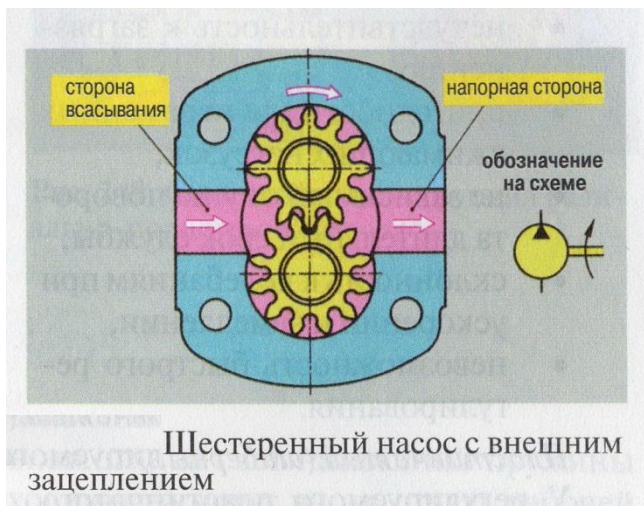
Часто применяют комплексные стандартные гидравлические блоки- гидростанции, которыми достаточно просто оснастить различные машины и технологические установки. Гидростанция содержит Эл.двигатель, который через муфту соединён с гидронасосом, а также вспомогательными элементами. Гидравлические насосы передают механическую энергию в рабочую жидкость. Это достигается за счёт постоянного вытеснения жидкости из всасывающего трубопровода в напорную линию. В зависимости от конструкции различают: - шестерённые гидронасосы; - пластинчатые (шиберные) гидронасосы; - поршневые гидронасосы.

Объём жидкости, вытесненный за один рабочий ход насоса, называют объёмной подачей  $V$ , умножив которую на число оборотов насоса, получаем объёмный расход  $Q$ . При выборе гидронасоса учитывают такие его параметры: объёмная подача, допустимое максимальное давление, КПД, уровень шума. Мощность, отдаваемая насосом в рабочую жидкость, составляет:

$$P = p * Q * \eta$$

где:  $P$ - отдаваемая выходная мощность;  $p$  - давление;  $Q$ - объёмная подача;  $\eta$  - КПД.

Шестерный насос с внешним зацеплением содержит пару сопряжённых зубчатых колёс, в результате вращательного движения которых рабочая жидкость во впадинах между зубьями вытесняется вдоль стенки корпуса от стороны всасывания к напорной стороне. Для шестерных насосов характерен низкий уровень шума.



Гидроаккумуляторы позволяют: -аккумулировать энергию; -гасить вибрации; -компенсировать колебания объёмной подачи; -создавать резервный объём масла на случай утечек; -содержат запас энергии для аварийных ситуаций.

Гидроаккумуляторы бывают: мембранные, баллонные, поршневые. С точки зрения рабочего давления различают гидроприводы низкого давления (до 1,6 МПа), среднего (1,6...6,3 МПа) и высокого давления (6,3...20 МПа). Гидроприводы низкого давления применяются для автоматизации станков, предназначенных для финишной обработки, при которой колебания нагрузки и сама нагрузка- незначительны. Гидроприводы среднего давления применяют для автоматизации технологического оборудования, где питание осуществляется от традиционных лопастных или шестерных насосов. Гидроприводы высокого давления применяют в мощных протяжных и строгальных станках, а также для автоматизации заготовительных производств. К гидравлическим приводным механизмам относятся цилиндры (одностороннего, двустороннего действия, дифференциальные), поворотные двигатели, гидромоторы.

Для гидронасосов и гидродвигателей характерны взаимная обратимость. В зависимости от того, какая величина- расход рабочей жидкости или вращение вала- является входом, а какая- выходом, одно и то же гидравлическое устройство может служить и двигателем, и гидронасосом. По решаемым задачам управления различают цикловые (с управлением по пути, давлению или времени), следящие, адаптивные и программные гидросистемы.

К основным устройствам аналоговой гидравлической сервотехники относятся:

- дросселирующие гидрораспределители, применяемые в высокودинамичных приводах (в электроэрозионных станках) и в качестве усилителей момента в незамкнутых системах регулирования перемещений высокой точности;
- гидрораспределители с пропорциональным электроуправлением, применяемые в разомкнутых системах дистанционного управления вспомогательными механизмами и в замкнутых системах невысокой точности.

Возможности аналоговой гидравлической сервотехники принципиально ограничены (дрейф нуля, низкие помехоустойчивость и надёжность), поэтому всё более широкое применение находит цифровая гидравлическая сервотехника.

К устройствам цифровой гидравлической сервотехники относятся ротационные и линейные приводы с механическим и электрическим управлением, управляемые регуляторы расхода и предохранительные клапаны.

Управляемые цифровые гидроприводы различных типов применяются в станках и технологическом оборудовании с ЧПУ, промышленных роботах. Вспомогательных механизмах для регулирования скорости движение серводвигателей. В системах цифровой гидравлической сервотехники в качестве задатчиков используются маломощные шаговые эл.двигатели.



В прецизионном оборудовании применение цифровой гидравлической сервотехники с эл.обратной связью позволяет обеспечить:

- тонкое регулирование расхода непрерывно дозируемых рабочих жидкостей, поступающих в гидродвигатели большого рабочего объёма, при этом достигается точность перемещений в пределах сотых долей микрометра;
- совмещение в минимальном количестве элементов функций двигателя, направляющего устройства и контроля (например, с помощью лазерного интерферометра) и др.

Важно также отметить, что в технологическом оборудовании всё более широкое применение находят гидростатические направляющие- в зазор между поверхностями органов, перемещающихся друг относительно друга, под давлением подаётся рабочая жидкость, что исключает прямой контакт этих поверхностей.

Это позволяет:

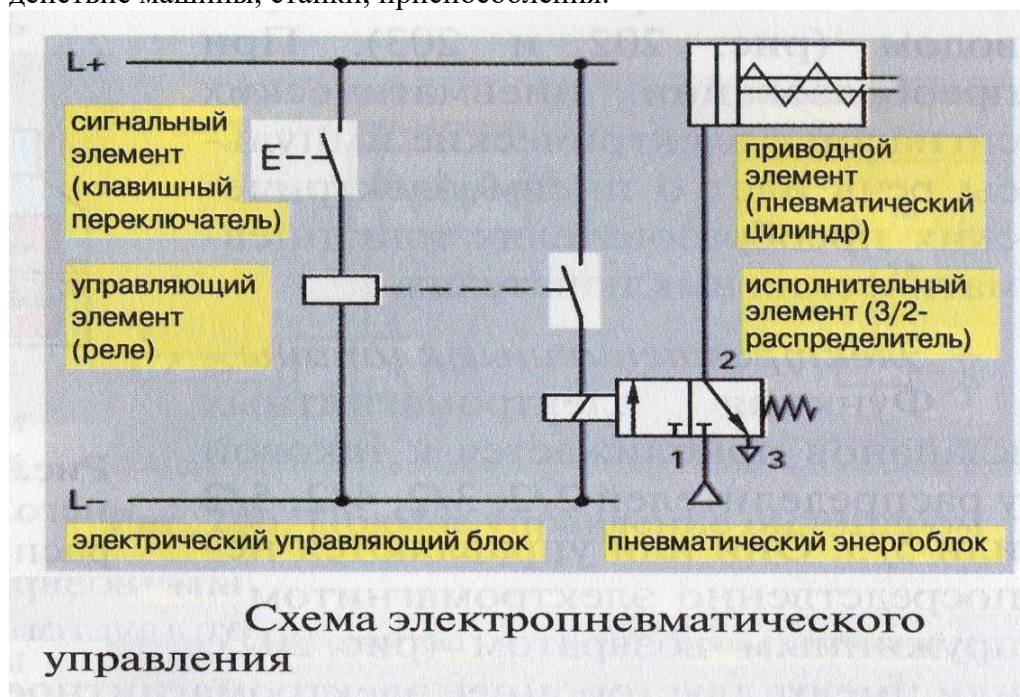
- исключить механическое трение и повысить срок службы базирующих поверхностей;
- повысить геометрическую точность перемещений;
- обеспечить внутреннее демпфирование в подвижных соединениях и возможность сверхмалых коррекций положения.

### Комбинированные системы управления

#### Электропневматические системы управления

Предназначены для пневматического привода машин и устройств и электрического управления ими. Электрический управляющий блок принимает импульсы, проходящие через сигнальные элементы (кнопки, выключатели, датчики). Управляющие элементы (реле, контакторы, программы, хранимые в памяти) обрабатывают эти импульсы (соединяют, замедляют, усиливают) и выдают соответствующие коммутационные сигналы на пневматические распределители электромагнитного действия.

В пневматическом энергоблоке исполнительные элементы (распределители электромагнитного действия) управляют цилиндрами и двигателями, приводящими в действие машины, станки, приспособления.



## **Гидропневматические системы управления**

В силу сжимаемости воздуха пневматический цилиндр не способен выполнять движения с постоянной скоростью. Поэтому он практически не годен для подачи инструмента в сверлильных, шлифовальных, фрезерных и токарных станках. С целью решения этих задач менее дорогим путём, чем использование гидравлического привода, применяют сочетание пневматических и гидравлических силовых головок. Гидропневматические блоки цилиндров могут, например, быстро подводить рабочий инструмент к заготовке, выполнять медленное равномерное движение для операции обработки и возвращается назад в режиме ускоренного хода.

Равномерное движение подачи может быть достигнуто также с помощью соответственных преобразователей рабочих сред.

Преобразователи рабочих сред представляют собой находящиеся под давлением маслосборники, заполненные примерно на 2/3 маслом баки, в которых сжатый воздух давит на поверхность масла либо непосредственно, либо через плавающий поршень. Масло протекает через регулируемые дроссели в цилиндр и заставляет его поршневой шток выдвигаться с равномерной скоростью.

## **Автоматизированная система управления технологического процесса и технического объекта**

В настоящее время на смену приборному этапу промышленной автоматики пришёл следующий, сущность которого состоит в переходе от автоматизации только «действий» к автоматизации «принятия решений». Техническая сущность системного этапа в автоматизации производства заключается в переходе от стабилизации технологических параметров и автоматизации повторных действий («цикловой автоматики») к решению с помощью современных средств вычислительной техники задач оптимального управления, т.е. автоматического выбора и реализации последовательности операций наиболее эффективного варианта управления.

АСУ ТП и ТО – это система, которая на базе высокоэффективной вычислительной и управляющей техники обеспечивает автоматизированное управление технологическим комплексом с использованием информации, обработанной по заданным технологическим и технико-экономическим критериям, определяющим качественные и количественные результаты обработки объекта. От управляющей части системы требуется, с помощью управляющих воздействий, обеспечить оптимальные или экстремальные значения критерия управления в условиях наличия помех (с которой работают промышленные установки) и с учетом ограничений, накладываемых на пределы изменения некоторых координат системы (температуры, давления, расхода топлива и т.д.).

При создании АСУ ТП и ТО должны быть определены цель её функционирования и роль её в общей структуре управления.

По виду функций, для реализации которой предназначены АСУ ТП можно выделить:

- Информационно-измерительные АСУ ТП – системы, предназначенные для сбора и выдачи информации о состоянии ОУ.
- Информационно-управляющие АСУ ТП. На основании информации о параметрах технологического процесса, поступающей от датчиков, технико-экономических показателей и алгоритмов выработки управляющих воздействий система производит расчет оптимальных условий ведения технологического процесса.
- АСУ ТП в режиме супервизорного управления. Задача режима супервизорного управления – поддержание процесса вблизи оптимальной рабочей точки путём оперативного воздействия на него, при этом значения управляющих воздействий

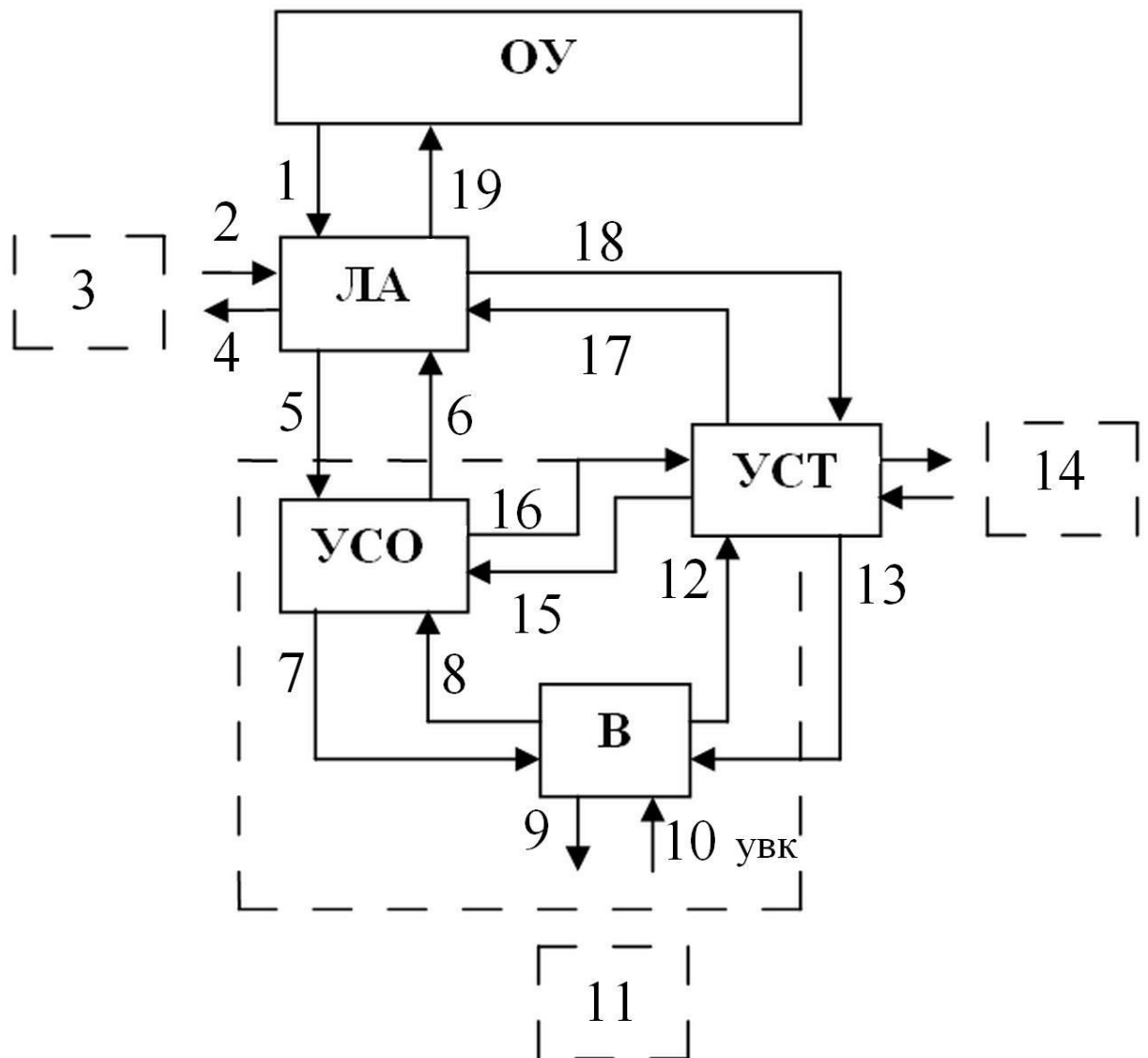
выдаются не оператору, а преобразуются в форму, удобную для изменения настроек регуляторов.

- АСУ ТП в режиме непосредственного цифрового управления. Отличие таких систем заключается в том, что сигналы, используемые для приведения в действие управляющих органов на объекте, поступают непосредственно от АСУ, а регуляторы вообще исключаются из системы. На вычислительные средства АСУ возлагаются такие функции, как реализация различных законов регулирования, связей между отдельными контурами многосвязного регулирования, управление по возмущению, адаптивное управление.

В состав структуры АСУ ТП и ТО входят:

- приборы и устройства локальной автоматики (ЛА);
- устройство связи с объектом (УСО);
- вычислитель (В);
- устройство связи с технологами (УСТ)

**Структура АСУ ТП и ТО**



К ЛА относятся датчики, нормирующие преобразователи, вторичные приборы, регуляторы и задатчики к ним, исполнительные механизмы и регулирующие органы.

Стрелкой 1 обозначена информация, снимаемая с ОУ – значения технологических параметров, воспринимаемых датчиками. Датчики, исполнительные механизмы и регулирующие органы устанавливают непосредственно на технологических агрегатах.



Вторичные приборы, регуляторы и другие приборы ЛА komponуют обычно в местные щиты (позиция 3) – стрелки 2 и 4.

Информация о состоянии ОУ (стрелка 5) поступает в УСО от тех же датчиков, которые нагружены вторичными приборами и регуляторами.

В устройстве связи УСО аналоговые сигналы преобразуются в цифровые и подвергаются масштабированию, линеаризации, аппроксимации, т.е. первичной обработке. Часто первичная обработка сигналов осуществляется не в отдельном цифровом блоке, а в том же вычислителе В, который предназначен для более сложных расчетов. Выбор варианта зависит от требований к быстродействию, стоимости, надёжности.

На УСО информация в цифровых кодах по стрелке 7 поступает в вычислитель В управляющего вычислительного комплекса УВК. На основании этой информации и сигналов 13 от оператора-технолога 14 вычислитель по заложенным в виде программ алгоритмам управления формирует рекомендации по управлению 12 и управляющие воздействия 8, которые после соответствующего преобразования в УСО поступают на регуляторы, исполнительные механизмы и регулирующие органы ЛА.

### **Иерархическая структура управления в АСУ ТП и ТО**

Задачи, решаемые в АСУ, могут быть представлены в виде иерархической структуры:

1-ый уровень. Управление, регулирование или стабилизация. Выработка управляющих воздействий в соответствии с выбранными линейными законами управления при нормальном режиме работы технологического комплекса.

2-ой уровень. Проверка значений технологических параметров и состояния технологического оборудования по отношению к нормальному режиму работы. Выработка управляющих воздействий в случае предаварийной ситуации.

3-ий уровень. Оптимизация в динамике и статике критерия управления и выработка задания на ОУ.

4-ый уровень. Координация работы отдельных технологических агрегатов, из которых состоит технологический объект управления.

5-ый уровень. Вся система организуется с учетом внешних воздействий и ограничений.

### **Основные функции АСУ ТП и ТО**

Ими являются информационно-вычислительные и управляющие. К информационно-вычислительным относятся:

- сбор, первичная обработка и хранение информации;
- косвенные измерения параметров процесса и состояния технологического оборудования;
- сигнализация состояний технологических параметров и оборудования;
- контроль и регистрация отклонений параметров технологического процесса от заданных;
- анализ срабатывания блокировок и защит технологического оборудования;
- диагностика и прогнозирование состояния комплекса технических средств;
- оперативное отображение информации и рекомендации по ведению ТП и управлению технологическим оборудованием.

К управляющим относятся:

- одноканальное логическое управление (выполнение блокировок, защит и т.п.);
- регулирование отдельных параметров ТП;
- каскадное регулирование;
- многосвязное регулирование;
- дискретное управление технологическими процессами и оборудованием;

- оптимальное управление установившимися и неуставившимися режимами;
- адаптивное управление.

### **Принципы управления в АСУ ТП и ТО**

1. Централизованное управление технологическими объектами. Первоначально развитие АСУ ТП было связано с существенной централизацией функций сбора, обработки, хранения и передачи данных, а также функций оперативного управления на мощной управляющей ЭВМ. Такой переход привёл к удорожанию каналов связи, ограниченной гибкости и усложнению программного обеспечения.
2. Децентрализованное управление. В этих системах автономные блоки, основу которых составляют микропроцессоры и персональные ЭВМ, выполняют на месте всю вычислительную работу, относящуюся к данному узлу оборудования, что даёт следующие преимущества:
  - упрощения программирования в связи с распределением программ между отдельными процессорами;
  - ускорение реакции в реальном времени;
  - повышенную надёжность;
  - простоту подключения к существующей вычислительной системе;
  - возможность ввода систем в эксплуатацию по частям и др.

### **Разновидности структур АСУ ТП и ТО**

1. Функциональная структура – определяет класс целей, для достижения которых проектируется АСУ ТП и ТО.

Обычно такая структура включает следующие подсистемы:

- подсистема сбора, первичной обработки информации;
- подсистема управления и выдачи управляющих воздействий;
- подсистема формирования сводных показателей;
- подсистема регистрации и анализа производственной ситуации.

2. Алгоритмическая структура – совокупность алгоритмов и условий их работы; на ней указываются связи, определяющие последовательность выполнения алгоритмов.

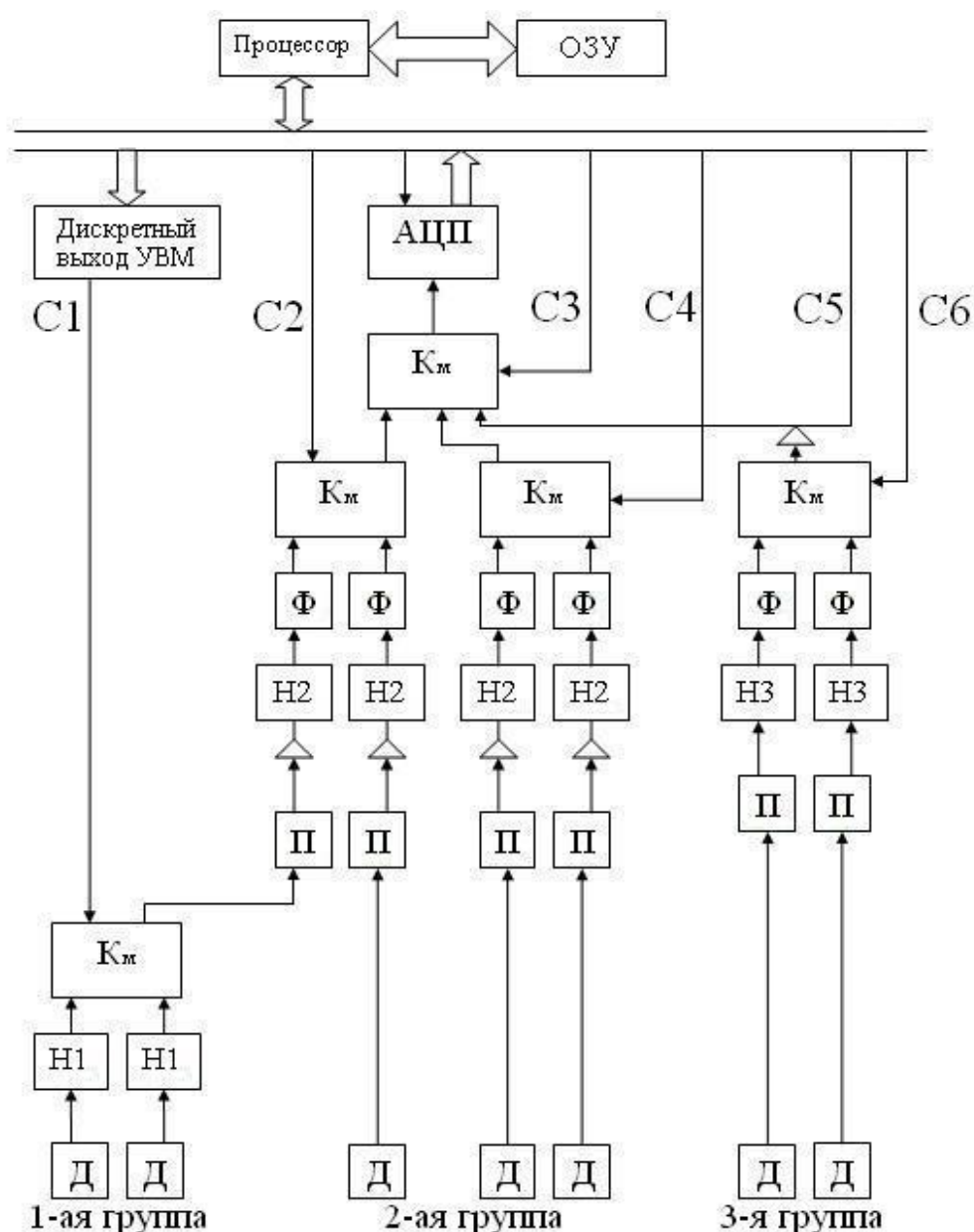
3. Техническая структура – комплекс технических средств в виде отдельных узлов и блоков, предназначенных для реализации функций АСУ ТП и ТО; указываются связи между блоками и оговаривается их функционирование в структуре.

4. Информационная структура связывает подсистемы АСУ ТП и ТО с транспортными средствами, вспомогательными механизмами, и в случае применения нестандартных блоков указывает уровни сигналов на входах и выходах этих блоков для согласования со стандартным оборудованием.

5. Организационная структура – совокупность правил и инструкций, устанавливающих нормы работы персонала и комплекса технических средств по управлению технологическим оборудованием в нормальных, предаварийных и аварийных режимах.

### **Подсистема сбора и первичной обработки информации**

Схема компоновки технических средств ввода аналоговых сигналов.



Компоновка технических средств на данной схеме выполнена по трем группам датчиков:

- 1-ая группа датчиков – для измерения параметров одной физической природы,
- 2-ая группа датчиков, значительно удалённых от УВМ – для измерения параметров различной физической природы,
- 3-я группа датчиков, близко расположенных к объекту – для измерения различных параметров.

К 1-ой группе датчиков подключены нормализаторы Н1, смещающие уровень сигнала так, чтобы сигнал входил в контролируемый диапазон, нормализаторы Н2 служат для преобразования токового сигнала в напряжение, а нормализаторы Н3 осуществляют линейную или нелинейную компенсацию, например, компенсацию ЭДС холодного спая термопары. Кроме того, в ряде случаев нормализаторы используют для ослабления сигналов.

Преобразователи П предназначены для преобразования физических характеристик в электрические сигналы тока или напряжения; коммутационное устройство Км – для переключения каналов измерения.

С целью устранения помех промышленной частоты 50 Гц и радиопомех с частотой  $f > 0,2/T_{\text{опр}}$  ( $T_{\text{опр}}$  – период опроса датчиков) в схемах компоновки технических средств применяются аналоговые RC-фильтры.

В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в АСУ ТП и ТО рекомендуется интегрирующий АЦП, обладающий высокой помехозащищенностью, хотя и невысокой скоростью преобразования.

Линии связи С1 – С6 служат для передачи сигналов управления от УВМ к соответствующим техническим средствам.

### **Алгоритмическое и математическое обеспечение подсистем сбора и первичной обработки информации**

В технических требованиях на разработку подпрограммы ввода аналоговых сигналов (опроса датчиков) должны быть указаны методы опроса датчиков и периодичность работы подпрограммы ввода аналоговых сигналов.

Существуют три метода опроса:

1. Одноточечный (считывается только один сигнал, обрабатывается, затем считывается второй сигнал и т.д.);
2. Метод последовательной таблицы (считывается большое количество сигналов по последовательным адресам коммутатора);
3. Метод произвольной таблицы (адреса располагаются в произвольном порядке).

Периодичность подпрограммы ввода аналоговых сигналов также может быть реализована несколькими способами:

1. По запросу информации от другой подпрограммы;
2. Через фиксированные интервалы времени, задаваемые таймером;
3. При запуске АСУ ТП и ТО, после которого реализуется непрерывный цикл опроса датчиков, причем за последним следует первый.

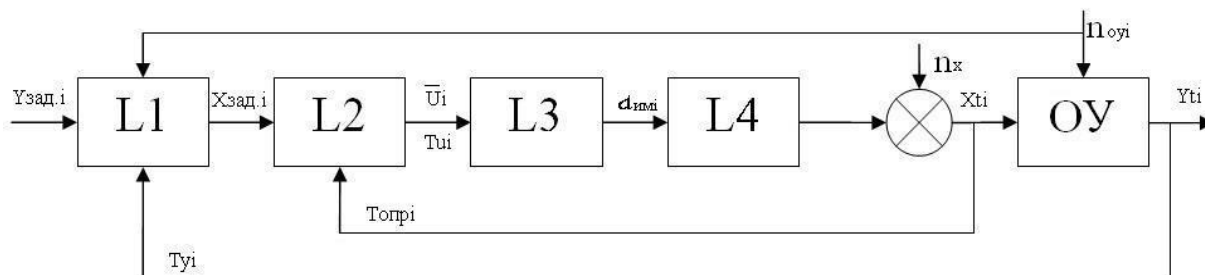
### **Подсистема управления технологическим процессом и техническим объектом.**

Подсистема управления ТП и ТО включает в себя управление:

1. регулирующими органами от аналоговых выходов УВМ,
2. исполнительными механизмами, работающими с постоянной скоростью,
3. двухпозиционными регулирующими органами и механизмами,
4. сигнализацией.

Кроме того, подсистема управления включает процедуру оптимизации, в соответствии с которой на основании текущей информации об объекте и принятого критерия управления рассчитываются установки для контуров НЦУ (непосредственного цифрового управления). Управление одномерным объектом от аналогового выхода УВМ

### **Структурная расчетная схема НЦУ одномерным объектом**



- $Y_{\text{зад},i}$  – задание по качеству продукции или производительности технологических агрегатов  $i$ -му каналу управления от верхней ступени иерархии,
- $Y_{ti}$  – текущее значение управляемой переменной объекта,

- $noy_i$  – контролируемые или измеряемые возмущения на ОУ (например, изменение состава сырья),
- $X_{ti}$  – регулируемая переменная на входе ОУ (например, расход материала, топлива и т.п.),
- $nx$  – неконтролируемые возмущения на входе ОУ,
- $L1$  – алгоритм адаптивного или экстремального управления, на основании которого рассчитывается задание для контура НЦУ ( $L2 - L3 - L4 - L2$ )

$$X_{зад.i} = L1 \{ Y_{зад.i}, Y_{ti}, noy_i, X_{ti} \},$$

$L2$  – алгоритм расчета по выбранному закону управления, например, пропорционально-интегральному, кода управляющего воздействия в функции от ошибки рассогласования  $E_{ij}$ :

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_{ij} &= f(\bar{E}_{ij}), \bar{E}_{ij} = \bar{X}_{зад.i} - \bar{X}_{Cij} \\ \bar{U}_{ij} &= \bar{U}_{i(j-1)} + \Delta \bar{U}_{ij} \end{aligned}$$

$L3$  – операция преобразования кода управляющего воздействия с усилием до требуемой мощности в перемещение исполнительного механизма  $\alpha_{имi}$ ,

$L4$  – операция преобразования перемещения ИМ в перемещение регулирующего органа.

Установка для контура НЦУ  $X_{зад.i}$  рассчитывается с частотой  $1/T_{ui}$ , которая определяется сменой задания  $Y_{зад.i}$  на входе алгоритма  $L1$ . Управление во внутреннем контуре считается с частотой  $1/T_{ui}$ , причём величина интервала  $T_{ui}$  определяется динамикой ОУ. Опрос датчика идёт с дискретностью  $T_{opr.i}$  ( $i$  – номер канала управления), величина которой выбирается по допустимой реакции системы на предаварийную ситуацию на объекте управления, т.е.

$$T_{opr.i} < T_{ui} < T_{yi}$$

Если регулируемую переменную на входе ОУ измерить невозможно, то датчики ставят на выходе ИМ, измеряя при этом положение исполнительного механизма; при этом контур НЦУ ( $L2 - L3 - L2$ ) будет выполнять роль регулятора, стабилизирующего угол поворота  $\alpha_{имi}$  или перемещение исполнительного механизма с некоторой точностью

$$E_{ij} \leq \delta_{ij} \quad (\delta_{ij} - \text{зона нечувствительности исполнительного механизма})$$

т.к. в АСУ ТП и ТО обычно имеется много регулируемых переменных, то целесообразно использовать программу многоканального цифрового регулятора.