

**Управление техническими системами**  
*курс лекций*

Учебное пособие написано по материалам курса «Управление техническими системами», читаемого на кафедре Автоматизации химико-технологических процессов УГНТУ для студентов различных специальностей.

Изложенный материал разделен на три части:

- 1) теория автоматического управления, в которой содержатся теоретические основы построения систем управления;
- 2) средства автоматизации и управления, где описываются основные методы измерения и средства автоматизации, используемые в нефтедобыче, нефтепереработке и нефтехимии;
- 3) современные системы управления производством, где вкратце перечислены основные аспекты построения АСУ ТП.

## ЧАСТЬ 1. ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (ТАУ)

### 1. Основные термины и определения ТАУ.

#### 1.1. Основные понятия.

Системы управления современными химико-технологическими процессами характеризуются большим количеством технологических параметров, число которых может достигать нескольких тысяч. Для поддержания требуемого режима работы, а в конечном итоге – качества выпускаемой продукции, все эти величины необходимо поддерживать постоянными или изменять по определенному закону.

Физические величины, определяющие ход технологического процесса, называются **параметрами технологического процесса**. Например, параметрами технологического процесса могут быть: температура, давление, расход, напряжение и т.д.

Параметр технологического процесса, который необходимо поддерживать постоянным или изменять по определенному закону, называется **регулируемой величиной** или **регулируемым параметром**.

Значение регулируемой величины в рассматриваемый момент времени называется **мгновенным значением**.

Значение регулируемой величины, полученное в рассматриваемый момент времени на основании данных некоторого измерительного прибора называется ее **измеренным значением**.

**Пример 1.** Схема ручного регулирования температуры сушильного шкафа.

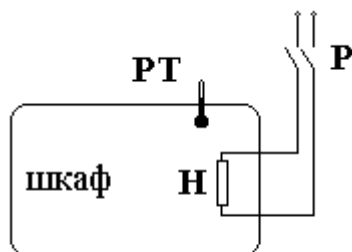


Рис. 1.1

Требуется вручную поддерживать температуру в сушильном шкафу на уровне  $T_{\text{зад}}$ .

Человек-оператор в зависимости от показаний ртутного термометра РТ включает или выключает нагревательный элемент Н с помощью рубильника Р. ♦

На основе данного примера можно ввести определения:

**Объект управления** (объект регулирования, ОУ) – устройство, требуемый режим работы которого должен поддерживаться извне специально организованными управляющими воздействиями.

**Управление** – формирование управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый режим работы ОУ.

**Регулирование** – частный вид управления, когда задачей является обеспечение постоянства какой-либо выходной величины ОУ.

**Автоматическое управление** – управление, осуществляемое без непосредственного участия человека.

**Входное воздействие (X)** – воздействие, подаваемое на вход системы или устройства.

**Выходное воздействие (Y)** – воздействие, выдаваемое на выходе системы или устройства.

**Внешнее воздействие** – воздействие внешней среды на систему.

Структурная схема системы регулирования к примеру 1 изображена на рис. 1.2.

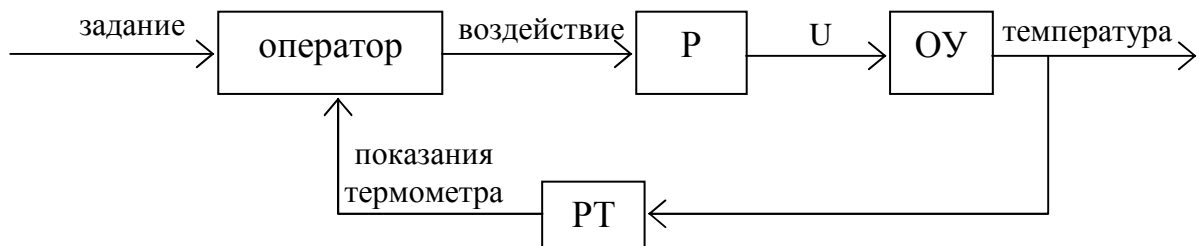


Рис. 1.2

**Пример 2.** Схема автоматического регулирования температуры сушильного шкафа.

В схеме используется ртутный термометр с контактами РТК. При повышении температуры до заданной контакты замыкаются столбиком ртути, катушка релейного элемента РЭ возбуждается и цепь нагревателя Н размыкается контактом РЭ. При понижении температуры контакты термометра размыкаются, реле обесточивается, возобновляя подачу энергии на объект (см. рис. 1.3). ♦

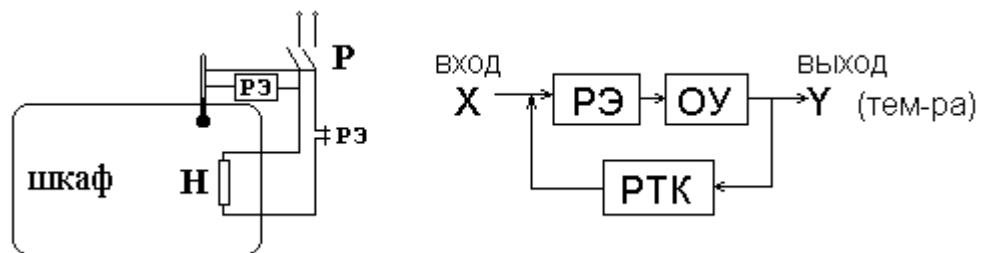


Рис. 1.3

**Пример 3.** Схема АСР температуры с измерительным мостом.

При температуре объекта, равной заданной, измерительный мост М (см. рис. 1.4) уравновешен, на вход электронного усилителя ЭУ сигнал не поступает и система находится в равновесии. При отклонении температуры изменяется сопротивление терморезистора  $R_T$  и равновесие моста нарушается. На входе ЭУ появляется напряжение, фаза которого зависит от знака

отклонения температуры от заданной. Напряжение, усиленное в ЭУ, поступает на двигатель Д, который перемещает движок автотрансформатора АТ в соответствующую сторону. При достижении температуры, равной заданной, мост сбалансировается и двигатель отключится.

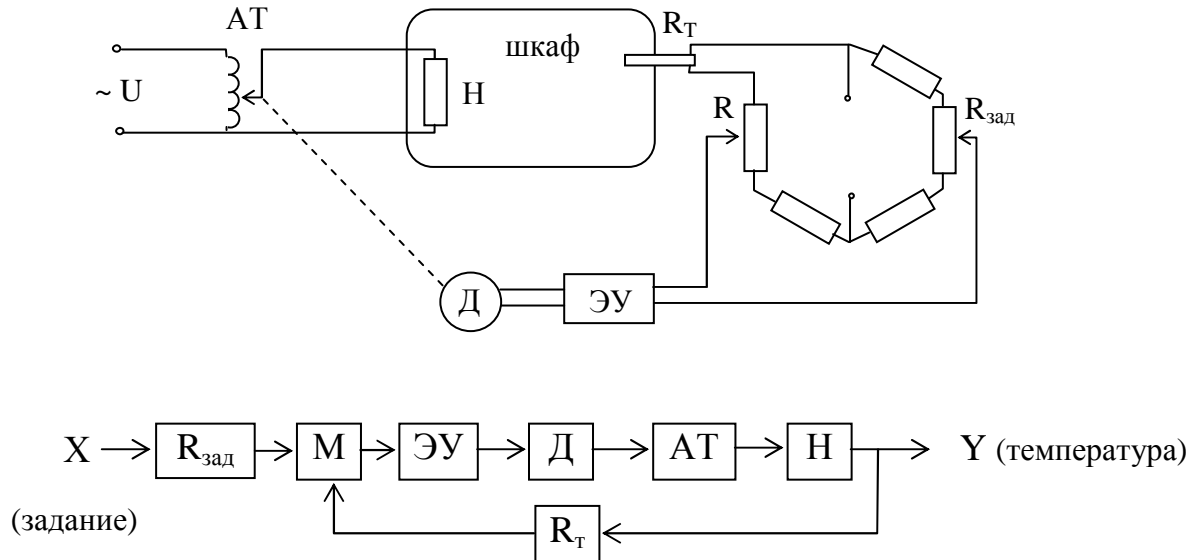


Рис. 1.4

Величина заданного значения температуры устанавливается с помощью резистора  $R_{зад}$ . ♦

Исходя из описанных примеров, можно определить типовую структурную схему одноконтурной АСР (см. рис. 1.5). Принятые обозначения:  $x$  - задающее воздействие (задание),  $e = x - y$  - ошибка регулирования,  $u$  - управляющее воздействие,  $f$  - возмущающее воздействие (возмущение).

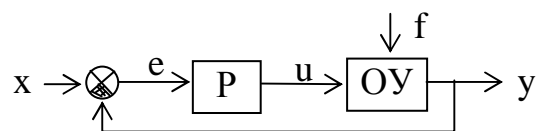


Рис. 1.5

Определения:

**Задающее воздействие** (то же, что входное воздействие  $X$ ) - воздействие на систему, определяющее требуемый закон изменения регулируемой величины).

**Управляющее воздействие** ( $u$ ) - воздействие управляющего устройства на объект управления.

**Управляющее устройство** (УУ) - устройство, осуществляющее воздействие на объект управления с целью обеспечения требуемого режима работы.

**Возмущающее воздействие** (f) - воздействие, стремящееся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной.

**Ошибка управления** ( $e = x - y$ ) - разность между предписанным (x) и действительным (y) значениями регулируемой величины.

**Регулятор** (P) - комплекс устройств, присоединяемых к регулируемому объекту и обеспечивающих автоматическое поддержание заданного значения его регулируемой величины или автоматическое изменение ее по определенному закону.

**Автоматическая система регулирования** (АСР) - автоматическая система с замкнутой цепью воздействия, в которой управление (u) вырабатывается в результате сравнения истинного значения y с заданным значением x.

Дополнительная связь в структурной схеме АСР, направленная от выхода к входу рассматриваемого участка цепи воздействий, называется обратной связью (ОС). Обратная связь может быть отрицательной или положительной.

## ***1.2. Классификация АСР.***

### **1. По назначению (по характеру изменения задания):**

- **стабилизирующая АСР** - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание поддерживать регулируемую величину на постоянном значении ( $x = \text{const}$ );
- **программная АСР** - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять регулируемую величину в соответствии с заранее заданной функцией (x изменяется программно);
- **следающая АСР** - система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять регулируемую величину в зависимости от заранее неизвестной величины на входе АСР ( $x = \text{var}$ ).

### **2. По количеству контуров:**

- **одноконтурные** - содержащие один контур,
- **многоконтурные** - содержащие несколько контуров.

### **3. По числу регулируемых величин:**

- **одномерные** - системы с 1 регулируемой величиной,
- **многомерные** - системы с несколькими регулируемыми величинами.

Многомерные АСР в свою очередь подразделяются на системы:

- а) несвязанного регулирования, в которых регуляторы непосредственно не связаны и могут взаимодействовать только через общий для них объект управления;
- б) связанного регулирования, в которых регуляторы различных параметров одного и того же технологического процесса связаны между собой вне объекта регулирования.

### **4. По функциональному назначению:**

АСР температуры, давления, расхода, уровня, напряжения и т.д.

### 5. По характеру используемых для управления сигналов:

- непрерывные,
- дискретные (релейные, импульсные, цифровые).

### 6. По характеру математических соотношений:

- линейные, для которых справедлив принцип суперпозиции;
- нелинейные.

**Принцип суперпозиции** (наложения): Если на вход объекта подается несколько входных воздействий, то реакция объекта на сумму входных воздействий равна сумме реакций объекта на каждое воздействие в отдельности:

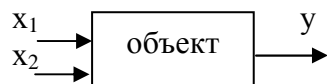


Рис. 1.6

$$\Lambda(x_1 + x_2) = \Lambda(x_1) + \Lambda(x_2),$$

где  $\Lambda$  - линейная функция (интегрирование, дифференцирование и т.д.).

### 7. По виду используемой для регулирования энергии:

- пневматические,
- гидравлические,
- электрические,
- механические и др.

### 8. По принципу регулирования:

- **по отклонению**:

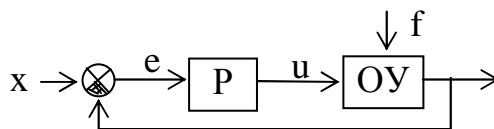
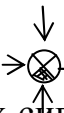


Рис. 1.7

подавляющее большинство систем построено по принципу обратной связи - регулирования по отклонению (см. рис. 1.7).

Элемент  называется сумматором. Его выходной сигнал равен сумме входных сигналов. Зачерненный сектор говорит о том, что данный входной сигнал надо брать с противоположным знаком.

- **по возмущению**.

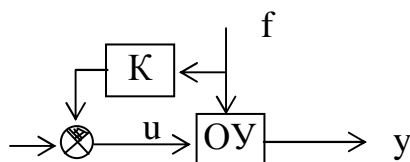


Рис. 1.8

Данные системы могут быть использованы в том случае, если есть возможность измерения возмущающего воздействия (см. рис. 1.8). На схеме обозначен К - усилитель с коэффициентом усиления К.

- **комбинированные** - сочетают в себе особенности предыдущих АСР.

Данный способ (см. рис. 1.9) достигает высокого качества управления, однако его применение ограничено тем, что возмущающее воздействие  $f$  не всегда можно измерить.

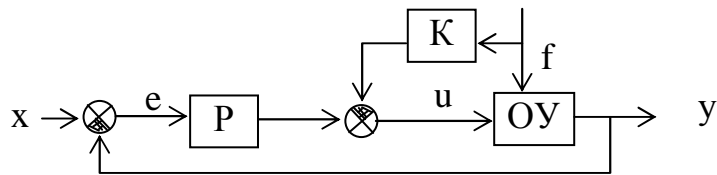


Рис. 1.9

### 1.3. Классификация элементов автоматических систем.

#### 1. По функциональному назначению:

- измерительные,
- усилительно-преобразовательные,
- исполнительные,
- корректирующие.

#### 2. По виду энергии, используемой для работы:

- электрические,
- гидравлические,
- пневматические,
- механические,
- комбинированные.

#### 3. По наличию или отсутствию вспомогательного источника энергии:

- активные (с источником энергии),
- пассивные (без источника).

#### 4. По характеру математических соотношений:

- линейные
- нелинейные.

#### 5. По поведению в статическом режиме:

- **статические**, у которых имеется однозначная зависимость между входным и выходным воздействиями (состояние статики). Примером является любой тепловой объект.
- **астатические** - у которых эта зависимость отсутствует. Пример: Зависимость угла поворота ротора электродвигателя от приложенного напряжения. При подаче напряжения угол поворота будет постоянно возрастать, поэтому однозначной зависимости у него нет.

## 2. Характеристики и модели элементов и систем.

### 2.1. Основные модели.

Работу системы регулирования можно описать словесно. Так, в п. 1.1 описана система регулирования температуры сушильного шкафа. Словесное описание помогает понять принцип действия системы, ее назначение, особенности функционирования и т.д. Однако, что самое главное, оно не дает количественных оценок качества регулирования, поэтому не пригодно для изучения характеристик систем и построения систем автоматизированного



управления. Вместо него в ТАУ используются более точные математические методы описания свойств систем:

- статические характеристики,
- динамические характеристики,
- дифференциальные уравнения,
- передаточные функции,
- частотные характеристики.

В любой из этих моделей система может быть представлена в виде звена, имеющего входные воздействия  $X$ , возмущения  $F$  и выходные воздействия  $Y$

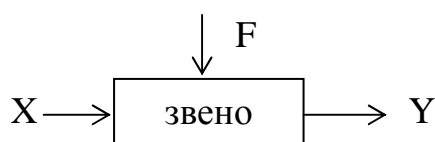


Рис. 1.10

Под влиянием этих воздействий выходная величина может изменяться. При этом при поступлении на вход системы нового задания она должна обеспечить с заданной степенью точности новое значение регулируемой величины в установившемся режиме.

**Установившийся режим** - это режим, при котором расхождение между истинным значением регулируемой величины и ее заданным значением будет постоянным во времени.

## 2.2. Статические характеристики.

**Статической характеристикой** элемента называется зависимость установившихся значений выходной величины от значения величины на входе системы, т.е.

$$y_{уст} = \varphi(x).$$

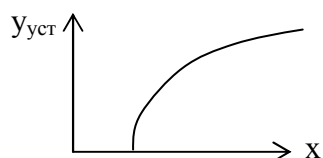


Рис. 1.11

Статическую характеристику (см. рис. 1.11) часто изображают графически в виде кривой  $y(x)$ .

**Статическим** называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии с течением времени устанавливается постоянная выходная величина. Например, при подаче на вход нагревателя различных значений напряжения он будет нагреваться до соответствующих этим напряжениям значений температуры.

**Астатическим** называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии сигнал на выходе непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т.д.

**Линейным статическим элементом** называется безинерционный элемент, обладающий линейной статической характеристикой:

$$y_{уст} = K \cdot x + a_0.$$

Как видно, статическая характеристика элемента в данном случае имеет вид прямой с коэффициентом наклона  $K$ .

Линейные статические характеристики, в отличие от нелинейных, более удобны для изучения благодаря своей простоте. Если модель объекта нелинейна, то обычно ее преобразуют к линейному виду путем линеаризации. САУ называется **статической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления  $e$  стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

САУ называется **астатической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

### 2.3. Динамические характеристики.

Переход системы от одного установившегося режима к другому при каких-либо входных воздействиях называется переходным процессом. Переходные процессы могут изображаться графически в виде кривой  $y(t)$ .

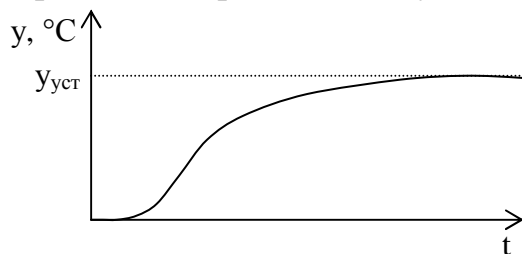


Рис. 1.12

Например, процесс нагрева сушильного шкафа до установившегося значения может иметь вид, представленный на рисунке 1.12.

То есть, переходный процесс характеризует динамические свойства системы, ее поведение.

Поскольку входные воздействия могут изменяться во времени, то и переходные характеристики будут каждый раз разные. Для простоты анализа систем входные воздействия приводят к одному из типовых видов (см. рис. 1.13).

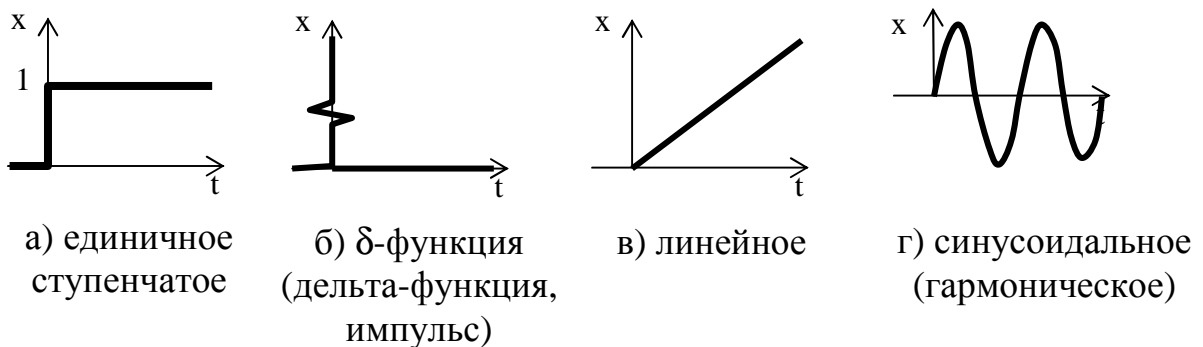


Рис. 1.13

В зависимости от вида входного воздействия функция  $y(t)$  может иметь разное обозначение:

**Переходной характеристикой  $h(t)$**  называется реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях, т.е. при  $x(0) = 0$  и  $y(0) = 0$ .

**Импульсной характеристикой  $\omega(t)$**  называется реакция объекта на  $\delta$ -функцию при нулевых начальных условиях.

При подаче на вход объекта синусоидального сигнала на выходе, как правило, в установившемся режиме получается также синусоидальный сигнал, но с другой амплитудой и фазой:  $y = A_{\text{вых}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ , где  $A_{\text{вых}}$  - амплитуда,  $\omega$  - частота сигнала,  $\varphi$  - фаза.

**Частотной характеристикой** (ЧХ, АФХ и др.) называется зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала системы в установившемся режиме при приложении на входе гармонического воздействия.

#### ***2.4. Дифференциальные уравнения. Линеаризация.***

Известно, что любое движение, процессы передачи, обмена, преобразования энергии и вещества математически можно описать в виде дифференциальных уравнений (ДУ). Любые процессы в АСР также принято описывать дифференциальными уравнениями, которые определяют сущность происходящих в системе процессов независимо от ее конструкции и т.д. Решив ДУ, можно найти характер изменения регулируемой переменной в переходных и установившихся режимах при различных воздействиях на систему.

Для упрощения задачи нахождения ДУ, описывающего работу АСР в целом, систему разбивают на ее отдельные элементы, переходные процессы в которых описываются достаточно простыми ДУ. Так как ДУ описывают работу системы независимо от физической сущности протекающих в ней процессов, то при разбивке системы нет необходимости учитывать их физическую целостность. Для каждого элемента структурной схемы необходимо составить ДУ, определяющее зависимость изменения выходной величины от входной.

Так как выходная величина предыдущего элемента является входной для последующего, то, определив ДУ отдельных элементов, можно найти ДУ системы.

Однако, такой метод применим только в частных случаях. Дело в том, что в большинстве случаев в реальных элементах системы связь между входной и выходной величинами является нелинейной и часто задается в графической форме. Поэтому, даже если ДУ системы и будет получено, оно будет нелинейным. А аналитическое решение нелинейных ДУ возможно далеко не всегда.

Для решения этой проблемы учитывают, что в процессе регулирования отклонения всех изменяющихся величин от их установившихся значений малы, и поэтому возможна замена нелинейных ДУ приближенными линейными ДУ, то есть возможна линеаризация дифференциальных уравнений.

Рассмотрим сущность процесса линеаризации на примере сушильного шкафа. Зависимость температуры объекта от подаваемого напряжения в большинстве случаев нелинейна и имеет вид, представленный на рисунке.

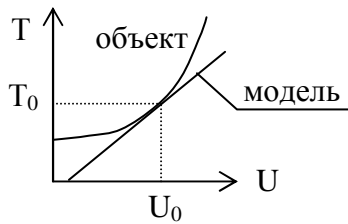


Рис. 1.14

Графически линейризацию некоторого уравнения от двух переменных  $F(x,y) = 0$  в окрестности некоторой точки  $(x_0, y_0)$  можно представить как замену рассматриваемого участка кривой на касательную (см. рис. 1.14), уравнение которой определяется по формуле:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y = 0,$$

где  $\frac{\partial F}{\partial x}$  и  $\frac{\partial F}{\partial y}$  - частные производные от  $F$  по  $x$  и  $y$ . Данное уравнение называется уравнением в приращениях, поскольку значения  $x$  и  $y$  здесь заменены на приращения  $\Delta x = x - x_0$  и  $\Delta y = y - y_0$ .

Линейризация ДУ происходит аналогично, отличие состоит только в том, что необходимо искать частные производные по производным ( $\frac{\partial F}{\partial x'}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial x''}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial x'''}$  и т.д.).

**Пример.** Линейризация нелинейного ДУ.

$$3xy - 4x^2 + 1,5 \frac{dx}{dt} y = 5 \frac{dy}{dt} + y$$

Данное ДУ является нелинейным из-за наличия произведений переменных  $x$  и  $y$ . Линейризуем его в окрестности точки с координатами  $x_0 = 1$ ,  $\dot{x}_0 = 0$ ,  $\dot{y}_0 = 0$ . Для определения недостающего начального условия  $y_0$  подставим данные значения в ДУ:

$$3y_0 - 4 + 0 = 0 + y_0 \quad \text{откуда} \quad y_0 = 2.$$

Введем в рассмотрение функцию

$$F = 3xy - 4x^2 + 1,5x'y - 5y' - y$$

и определим все ее производные при заданных начальных условиях:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_0 = (3y - 8x)|_0 = 3 \cdot 2 - 8 \cdot 1 = -2,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right|_0 = (3x + 1,5x' - 1)|_0 = 3 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0 - 1 = 2,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x'} \right|_0 = (1,5y)|_0 = 1,5 \cdot 2 = 3,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial y'} \right|_0 = -5.$$

Теперь, используя полученные коэффициенты, можно записать окончательное линейное ДУ:

$$-5 \Delta y' + 2 \Delta y + 3 \Delta x' - 2 \Delta x = 0.$$



### **2.5. Преобразования Лапласа.**

Исследование АСР существенно упрощается при использовании прикладных математических методов операционного исчисления. Например, функционирование некоторой системы описывается ДУ вида

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (2.1)$$

где  $x$  и  $y$  - входная и выходная величины. Если в данное уравнение вместо  $x(t)$  и  $y(t)$  подставить функции  $X(s)$  и  $Y(s)$  комплексного переменного  $s$  такие, что

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt \quad \text{и} \quad Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt, \quad (2.2)$$

то исходное ДУ при нулевых начальных условиях равносильно линейному алгебраическому уравнению

$$a_2 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_1 X(s) + b_0 X(s).$$

Такой переход от ДУ к алгебраическому уравнению называется **преобразованием Лапласа**, формулы (2.2) соответственно **формулами преобразования Лапласа**, а полученное уравнение - **операторным уравнением**.

Новые функции  $X(s)$  и  $Y(s)$  называются **изображениями**  $x(t)$  и  $y(t)$  по Лапласу, тогда как  $x(t)$  и  $y(t)$  являются **оригиналами** по отношению к  $X(s)$  и  $Y(s)$ .

Переход от одной модели к другой достаточно прост и заключается в замене знаков дифференциалов  $\frac{d^n}{dt^n}$  на операторы  $s^n$ , знаков интегралов  $\int \dots dt$  на множители  $\frac{1}{s}$ , а самих  $x(t)$  и  $y(t)$  - изображениями  $X(s)$  и  $Y(s)$ .

Для обратного перехода от операторного уравнения к функциям от времени используется метод **обратного преобразования Лапласа**. Общая формула обратного преобразования Лапласа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.3)$$

где  $f(t)$  - оригинал,  $F(j\omega)$  - изображение при  $s = j\omega$ ,  $j$  - мнимая единица,  $\omega$  - частота.

Эта формула достаточно сложна, поэтому были разработаны специальные таблицы (см. табл. 1.1 и 1.2), в которые сведены наиболее часто встречающиеся функции  $F(s)$  и их оригиналы  $f(t)$ . Они позволяют отказаться от прямого использования формулы (2.3).

**Таблица 1.2 - Преобразования Лапласа**

Оригинал $x(t)$	Изображение $X(s)$
$\delta$ -функция	1
1	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
$t^2$	$\frac{2}{s^3}$
$t^n$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{s + \alpha}$
$\alpha x(t)$	$\alpha X(s)$
$\sum_{i=1}^n x_i(t)$	$\sum_{i=1}^n X_i(s)$
$x(t - \alpha)$	$X(s)e^{-\alpha s}$
$\frac{d^n x(t)}{dt^n}$	$s^n X(s)$
$\int_0^t x(\tau) d\tau$	$\frac{X(s)}{s}$

**Таблица 1.2 - Формулы обратного преобразования Лапласа (дополнение)**

Изображение $X(s)$	Оригинал $x(t)$
$\frac{M}{s + \alpha}$	$M e^{-\alpha t}$
$\frac{M}{s + \alpha}$	$2e^{-\alpha_1 t} [M_1 \cos(\alpha_2 t) - M_2 \sin(\alpha_2 t)]$

Закон изменения выходного сигнала обычно является функцией, которую необходимо найти, а входной сигнал, как правило, известен. Некоторые типовые входные сигналы были рассмотрены в п. 2.3. Здесь приводятся их изображения:

единичное ступенчатое воздействие имеет изображение  $X(s) = \frac{1}{s}$ ,

дельта-функция  $X(s) = 1$ ,

линейное воздействие  $X(s) = \frac{1}{s^2}$ .

**Пример.** Решение ДУ с использованием преобразований Лапласа.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 5 \frac{dy}{dt} + 6y = 2 \frac{dx}{dt} + 12x$$

Допустим, входной сигнал имеет форму единичного ступенчатого воздействия, т.е.  $x(t) = 1$ . Тогда изображение входного сигнала  $X(s) = \frac{1}{s}$ .

Производим преобразование исходного ДУ по Лапласу и подставляем  $X(s)$ :

$$s^2 Y + 5sY + 6Y = 2sX + 12X,$$

$$s^2 Y + 5sY + 6Y = 2s \frac{1}{s} + 12 \frac{1}{s},$$

$$Y(s^3 + 5s^2 + 6s) = 2s + 12.$$

Определяется выражение для  $Y$ :

$$Y = \frac{2s + 12}{s^3 + 5s^2 + 6s}.$$

Оригинал полученной функции отсутствует в таблице оригиналов и изображений. Для решения задачи его поиска дробь разбивается на сумму простых дробей с учетом того, что знаменатель может быть представлен в виде  $s(s + 2)(s + 3)$ :

$$\begin{aligned} Y &= \frac{2s + 12}{s^3 + 5s^2 + 6s} = \frac{2s + 12}{s(s + 2)(s + 3)} = \frac{M_1}{s} + \frac{M_2}{s + 2} + \frac{M_3}{s + 3} = \\ &= \frac{(M_1 + M_2 + M_3)s^2 + (5M_1 + 3M_2 + 2M_3)s + 6M_1}{s(s + 2)(s + 3)}. \end{aligned}$$

Сравнивая получившуюся дробь с исходной, можно составить систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} M_1 + M_2 + M_3 = 0 \\ 5M_1 + 3M_2 + 2M_3 = 2 \\ 6M_1 = 12 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} M_1 = 2 \\ M_2 = -4 \\ M_3 = 2 \end{cases}$$

Следовательно, дробь можно представить как сумму трех дробей:

$$Y = \frac{2s+12}{s^3+5s^2+6s} = \frac{2}{s} - \frac{4}{s+2} + \frac{2}{s+3}.$$

Теперь, используя табличные функции, определяется оригинал выходной функции:

$$y(t) = 2 - 4e^{-2t} + 2e^{-3t}. \quad \blacklozenge$$

## 2.6. Передаточные функции.

### 2.6.1 Определение передаточной функции.

Преобразование ДУ по Лапласу дает возможность ввести удобное понятие передаточной функции, характеризующей динамические свойства системы.

Например, операторное уравнение

$$3s^2Y(s) + 4sY(s) + Y(s) = 2sX(s) + 4X(s)$$

можно преобразовать, вынеся  $X(s)$  и  $Y(s)$  за скобки и поделив друг на друга:

$$Y(s) \cdot (3s^2 + 4s + 1) = X(s) \cdot (2s + 4)$$

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2s + 4}{3s^2 + 4s + 1}.$$

Полученное выражение называется передаточной функцией.

**Передаточной функцией** называется отношение изображения выходного воздействия  $Y(s)$  к изображению входного  $X(s)$  при нулевых начальных условиях.

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.4)$$

Передаточная функция является дробно-рациональной функцией комплексной переменной:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n},$$

где  $B(s) = b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m$  - полином числителя,

$A(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n$  - полином знаменателя.

Передаточная функция имеет порядок, который определяется порядком полинома знаменателя ( $n$ ).

Из (2.4) следует, что изображение выходного сигнала можно найти как

$$Y(s) = W(s) \cdot X(s).$$

Так как передаточная функция системы полностью определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета АСР сводится к определению ее передаточной функции.



## 2.6.2 Примеры типовых звеньев.

Звеном системы называется ее элемент, обладающий определенными свойствами в динамическом отношении. Звенья систем регулирования могут иметь разную физическую основу (электрические, пневматические, механические и др. звенья), но относятся к одной группе. Соотношение входных и выходных сигналов в звеньях одной группы описываются одинаковыми передаточными функциями.

Простейшие типовые звенья:

- усилительное,
- интегрирующее,
- дифференцирующее,
- апериодическое,
- колебательное,
- запаздывающее.

### 1) Усилительное звено.

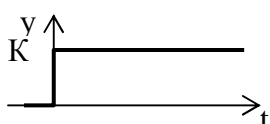


Рис. 1.15

Звено усиливает входной сигнал в  $K$  раз. Уравнение звена  $y = K \cdot x$ , передаточная функция  $W(s) = K$ . Параметр  $K$  называется **коэффициентом усиления**.

Выходной сигнал такого звена в точности повторяет входной сигнал, усиленный в  $K$  раз (см. рис. 1.15).

Примерами таких звеньев являются: механические передачи, датчики, безынерционные усилители и др.

### 2) Интегрирующее.

#### 2.1) Идеальное интегрирующее.

Выходная величина идеального интегрирующего звена пропорциональна интегралу входной величины.

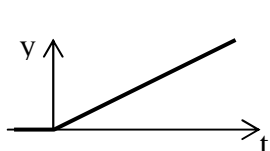


Рис. 1.16

$$y = K \int_0^t x(t) dt ; W(s) = \frac{K}{s}$$

При подаче на вход звена воздействия выходной сигнал постоянно возрастает (см. рис. 1.16).

Это звено астатическое, т.е. не имеет установившегося режима.

#### 2.2) Реальное интегрирующее.

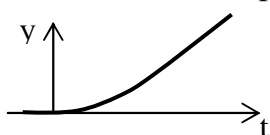


Рис. 1.17

Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

Переходная характеристика в отличие от идеального звена является кривой (см. рис. 1.17).

Примером интегрирующего звена является двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если в качестве входного воздействия

принять напряжение питания статора, а выходного - угол поворота ротора.

### 3) Дифференцирующее.

#### 3.1) Идеальное дифференцирующее.

Выходная величина пропорциональна производной по времени от входной:

$$y = K \frac{dx(t)}{dt}; \quad W(s) = K*s$$

При ступенчатом входном сигнале выходной сигнал представляет собой импульс ( $\delta$ -функцию).

#### 3.2) Реальное дифференцирующее.

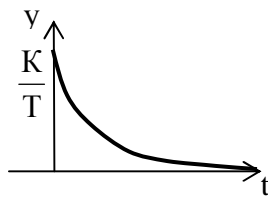


Рис. 1.18

Идеальные дифференцирующие звенья физически не реализуемы. Большинство объектов, которые представляют собой дифференцирующие звенья, относятся к реальным дифференцирующим звеньям. Переходная характеристика и передаточная функция этого звена имеют вид:

$$W(s) = \frac{Ks}{Ts + 1}$$

### 4) Аперриодическое (инерционное).

Этому звену соответствуют ДУ и ПФ вида:

$$T \frac{dy}{dt} + y = Kx; \quad W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

Определим характер изменения выходной величины этого звена при подаче на вход ступенчатого воздействия величины  $x_0$ .

Изображение ступенчатого воздействия:  $X(s) = \frac{x_0}{s}$ . Тогда изображение

выходной величины:

$$Y(s) = W(s) X(s) = \frac{K}{Ts + 1} \frac{x_0}{s} = K x_0 \frac{1}{s(Ts + 1)}$$

Разложим дробь на простые:

$$\frac{1}{s(Ts + 1)} = \frac{A}{Ts + 1} + \frac{B}{s} = \frac{As + BTs + B}{s(Ts + 1)} = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}}$$

Оригинал первой дроби по таблице:  $L^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1$ , второй:

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{s + \frac{1}{T}}\right\} = e^{-\frac{t}{T}}$$

Тогда окончательно получаем:

$$y(t) = K x_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Постоянная  $T$  называется **постоянной времени**. Большинство тепловых объектов являются аperiodическими звеньями. Например, при подаче на вход электрической печи напряжения ее температура будет изменяться по аналогичному закону (см. рис. 1.19).

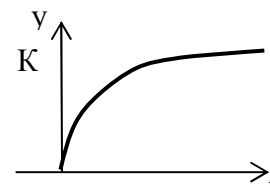


Рис. 1.19

5) Колебательное звено имеет ДУ и ПФ вида

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = Kx,$$

$$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}.$$

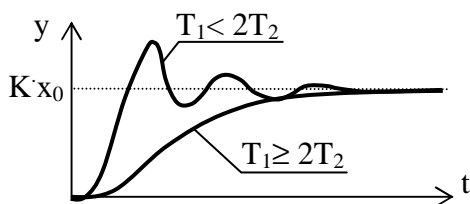


Рис. 1.20

При подаче на вход ступенчатого воздействия амплитудой  $x_0$  на переходная кривая будет иметь один из двух видов: аperiodический (при  $T_1 \geq 2T_2$ ) или колебательный (при  $T_1 < 2T_2$ ).

б) Запаздывающее.

$$y(t) = x(t - \tau), \quad W(s) = e^{-\tau s}.$$

Выходная величина  $y$  в точности повторяет входную величину  $x$  с некоторым запаздыванием  $\tau$ . Примеры: движение груза по конвейеру, движение жидкости по трубопроводу.

### 2.6.3 Соединения звеньев.

Поскольку исследуемый объект в целях упрощения анализа функционирования разбит нами на звенья, то после определения передаточных функций для каждого звена встает задача объединения их в одну передаточную функцию объекта. Вид передаточной функции объекта зависит от последовательности соединения звеньев:

1) Последовательное соединение.

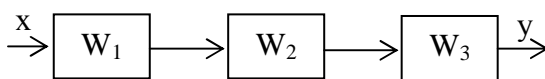


Рис. 1.21

$$W_{об} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \dots$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются.

2) Параллельное соединение.

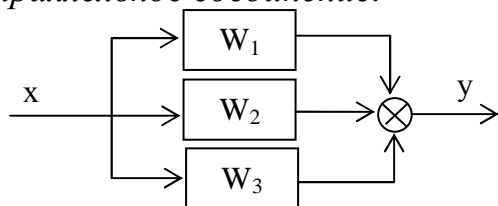


Рис. 1.22

$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции складываются.

## 3) Обратная связь

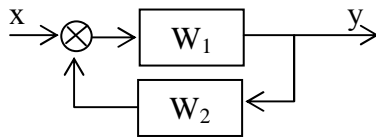


Рис. 1.23

Передаточная функция по заданию (x):

$$W_{\zeta}(s) = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$$

«+» соответствует отрицательной ОС,  
«->» - положительной.

Для определения передаточных функций объектов, имеющих более сложные соединения звеньев, используют либо последовательное укрупнение схемы, либо преобразуют по формуле Мезона.

### 2.6.4 Передаточные функции АСР.

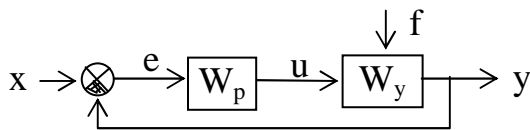


Рис. 1.24

Для исследования и расчета структурную схему АСР путем эквивалентных преобразований приводят к простейшему стандартному виду «объект - регулятор».

Это необходимо, во-первых, для того, чтобы определить математические зависимости в системе, и, во-вторых, как правило, все инженерные методы расчета и определения параметров настройки регуляторов применены для такой стандартной структуры.

В общем случае любая одномерная АСР с главной обратной связью путем постепенного укрупнения звеньев может быть приведена к такому виду.

Если выход системы y не подавать на ее вход, то мы получим разомкнутую систему регулирования, передаточная функция которой определяется как произведение:

$$W_{\infty} = W_p \cdot W_y$$

( $W_p$  - ПФ регулятора,  $W_y$  - ПФ объекта управления).

То есть последовательность звеньев  $W_p$  и  $W_y$  может быть заменена одним звеном с  $W_{\infty}$ .

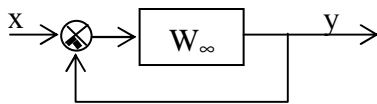


Рис. 1.25

Передаточную функцию замкнутой системы принято обозначать как  $\Phi(s)$ . Она может быть выражена через  $W_{\infty}$ :

$$\Phi_3(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_{\infty}(s)}{1 + W_{\infty}(s)}$$

(далее будем рассматривать только системы с обратной отрицательной связью, поскольку они используются в подавляющем большинстве АСР).

Данная передаточная функция  $\Phi_3(s)$  определяет зависимость y от x и называется передаточной функцией замкнутой системы по каналу задающего воздействия (по заданию).

Для АСР существуют также передаточные функции по другим каналам:

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + W_\infty(s)} \text{ - по ошибке,}$$

$$\Phi_B(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W y(s)}{1 + W_\infty(s)} \text{ - по возмущению.}$$

Поскольку передаточная функция разомкнутой системы является в общем случае дробно-рациональной функцией вида  $W_\infty = \frac{B(s)}{A(s)}$ , то передаточные функции замкнутой системы могут быть преобразованы:

$$\Phi_3(s) = \frac{\frac{B}{A}}{1 + \frac{B}{A}} = \frac{B}{A + B}, \quad \Phi_e(s) = \frac{1}{1 + \frac{B}{A}} = \frac{A}{A + B}.$$

Как видно, эти передаточные функции отличаются только выражениями числителей. Выражение знаменателя называется характеристическим выражением замкнутой системы и обозначается как  $D_3(s) = A(s) + B(s)$ , в то время как выражение, находящееся в числителе передаточной функции разомкнутой системы  $W_\infty$ , называется характеристическим выражением разомкнутой системы  $B(s)$ .

### 2.6.5 Определение параметров передаточной функции объекта по переходной кривой.

Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных о переходном процессе, называется идентификацией объекта.

Предположим, что при подаче на вход некоторого объекта ступенчатого воздействия была получена переходная характеристика (см. рис. 1.26). Требуется определить вид и параметры передаточной функции.

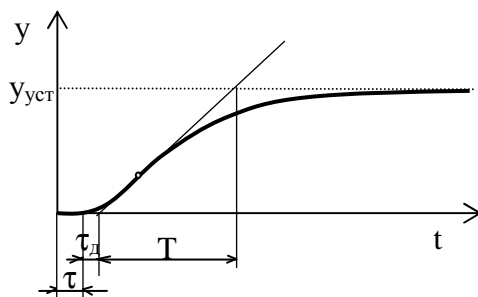


Рис. 1.26

Предположим, что передаточная функция имеет вид

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

(инерционному звену с запаздыванием).

Параметры передаточной функции:

$K$  - коэффициент усиления,

$T$  - постоянная времени,

$\tau$  - запаздывание.

Коэффициентом усиления называется величина, показывающая, во сколько раз данное звено усиливает входной сигнал (в установившемся режиме), и равна отношению выходной величины  $y$  в установившемся режиме к входной величине  $x$ :

$$K = \frac{\hat{y}_{\text{уст}}}{\hat{x}}$$

**Установившееся значение выходной величины**  $y_{уст}$  - это значение  $y$  при  $t \rightarrow \infty$ .

**Запаздыванием**  $\tau$  называется промежуток времени от момента изменения входной величины  $x$  до начала изменения выходной величины  $y$ .

**Постоянная времени**  $T$  может быть определена несколькими методами в зависимости от вида передаточной функции. Для рассматриваемой передаточной функции 1-го порядка  $T$  определяется наиболее просто: сначала проводится касательная к точке перегиба, затем находятся точки пересечения с осью времени и асимптотой  $y_{уст}$ ; время  $T$  определяется как интервал времени между этими точками.

В случае, если на графике между точкой перегиба имеется вогнутость, определяется дополнительное запаздывание  $\tau_{доп}$ , которое прибавляется к основному:  $\tau = \tau + \tau_{доп}$ .

## 2.7. Частотные характеристики.

### 2.7.1 Определение частотных характеристик.

Известно, что динамические процессы могут быть представлены частотными характеристиками (ЧХ) путем разложения функции в ряд Фурье.

Предположим, имеется некоторый объект и требуется определить его ЧХ. При экспериментальном снятии ЧХ на вход объекта подается синусоидальный сигнал с амплитудой  $A_{вх} = 1$  и некоторой частотой  $\omega$ , т.е.

$$x(t) = A_{вх} \sin(\omega t) = \sin(\omega t).$$

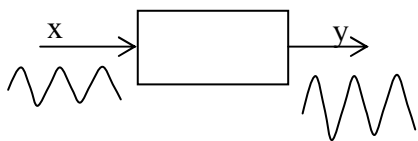


Рис. 1.27

Тогда после прохождения переходных процессов на выходе мы будем также иметь синусоидальный сигнал той же частоты  $\omega$ , но другой амплитуды  $A_{вых}$  и фазы  $\varphi$ :

$$y(t) = A_{вых} \sin(\omega t + \varphi)$$

При разных значениях  $\omega$  величины  $A_{вых}$  и  $\varphi$ , как правило, также будут различными. Эта зависимость амплитуды и фазы от частоты называется частотной характеристикой. Виды ЧХ:

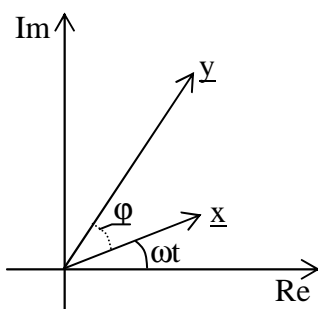


Рис. 1.28

- АФХ - зависимость амплитуды и фазы от частоты (изображается на комплексной плоскости);
- АЧХ - зависимость амплитуды от частоты;
- ФЧХ - зависимость фазы от частоты;
- ЛАХ, ЛАЧХ - логарифмические АЧХ.

На комплексной плоскости входная величина  $x = A_{вх} \sin(\omega t)$  для каждого момента времени  $t_i$  определяется вектором  $\underline{x}$  на комплексной плоскости. Этот вектор имеет длину, равную  $A_{вх}$ , и отложен под углом  $\omega t_i$  к действительной оси. (Re - действительная ось, Im - мнимая ось)

Тогда величину  $x$  можно записать в комплексной форме

$$\underline{x}(t) = A_{\text{вх}}(\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)),$$

где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица.

Или, если использовать формулу Эйлера  $e^{j\alpha} = \cos\alpha + j \sin\alpha$ , то можно записать

$$\underline{x}(t) = A_{\text{вх}} e^{j\omega t}.$$

Выходной сигнал  $y(t)$  можно аналогично представить как вектор

$$\underline{y}(t) = A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Рассмотрим связь передаточной функции и частотной характеристики.

Определим производные по Лапласу:

$$\begin{aligned} y &\rightarrow Y \\ y' &\rightarrow sY \\ y'' &\rightarrow s^2Y \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

Определим производные ЧХ:

$$\begin{aligned} y'(t) &= j\omega A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)} = j\omega y, \\ y''(t) &= (j\omega)^2 A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)} = (j\omega)^2 y \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

Отсюда видно соответствие  $s = j\omega$ . Вывод: частотные характеристики могут быть построены по передаточным функциям путем замены  $s = j\omega$ .

**Пример:**  $W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$ .

При  $s = j\omega$  имеем:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{K}{Tj\omega + 1} = \frac{K}{1 + jT\omega} = \frac{K(1 - jT\omega)}{(1 + jT\omega)(1 - jT\omega)} = \frac{K - j\omega KT}{1 + \omega^2 T^2} = \\ &= \frac{K}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{j\omega KT}{1 + \omega^2 T^2} = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega). \end{aligned}$$

Изменяя  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , можно построить АФХ (см. рис.). ♦

Для построения АЧХ и ФЧХ используются формулы:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}, \\ \varphi(\omega) &= \arctg \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}. \end{aligned}$$

Формулы получения АФХ по АЧХ и ФЧХ:

$$\text{Re}(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega),$$

$$\text{Im}(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

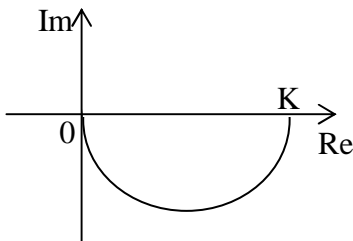


Рис. 1.29

### 2.7.2 Логарифмические частотные характеристики.

Логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) используются довольно часто для описания динамических параметров различных устройств. Существуют два основных вида ЛЧХ, которые, как правило, используются совместно и изображаются в виде графиков:

#### 1) ЛАЧХ - логарифмическая АЧХ.

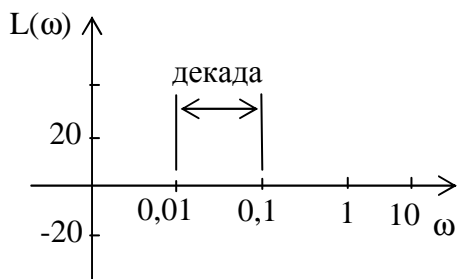


Рис. 1.30

Формула для построения ЛАЧХ:  $L(\omega) = 20 \lg A_{\text{вых}}(\omega)$ .

Единица измерения - децибел (дБ).

На графике ЛАЧХ по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе. Это означает, что равным величинам отрезков по оси  $\omega$  соответствуют кратные значения частоты. Для ЛЧХ кратность = 10.

По оси ординат откладываются значения  $L(\omega)$  в обычном масштабе.

2) ЛФЧХ - логарифмическая ФЧХ. Представляет из себя ФЧХ, у которой ось частоты  $\omega$  проградуирована в логарифмическом масштабе в соответствии с ЛАЧХ. По оси ординат откладываются фазы  $\varphi$ .

#### Примеры ЛЧХ.

##### 1. Фильтр низких частот (ФНЧ)

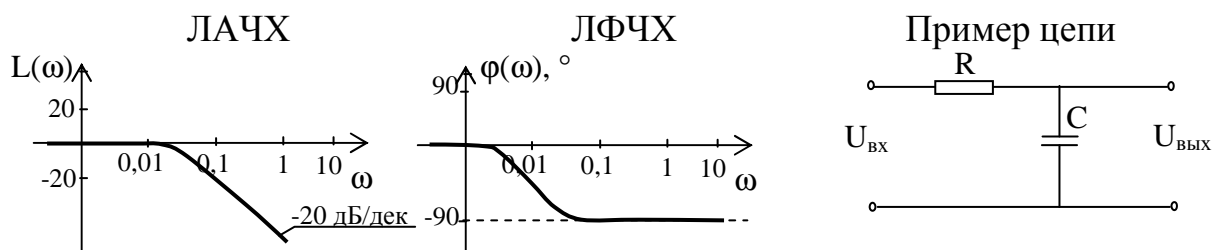


Рис. 1.31

Фильтр низких частот предназначен для подавления высокочастотных воздействий.

##### 2. Фильтр высоких частот (ФВЧ)

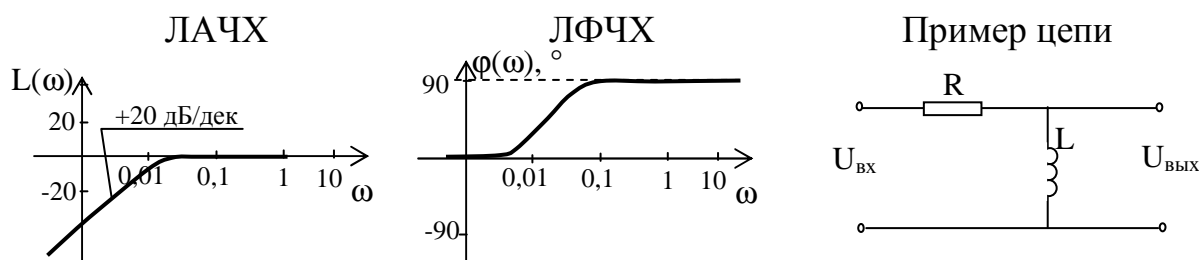


Рис. 1.32



Фильтр высоких частот предназначен для подавления низкочастотных воздействий.

### 3. Заградительный фильтр.

Заградительный фильтр подавляет только определенный диапазон частот

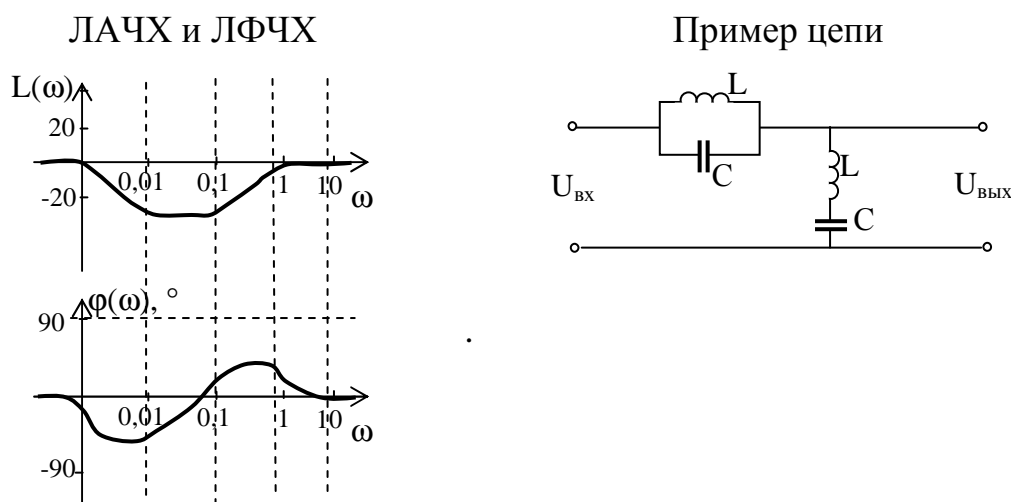


Рис. 1.33

## 3. Качество процессов управления.

### 3.1. Критерии устойчивости.

#### 3.1.1 Устойчивость.

Важным показателем АСР является устойчивость, поскольку основное ее назначение заключается в поддержании заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону. При отклонении регулируемого параметра от заданной величины (например, под действием возмущения или изменения задания) регулятор воздействует на систему таким образом, чтобы ликвидировать это отклонение. Если система в результате этого воздействия возвращается в исходное состояние или переходит в другое равновесное состояние, то такая система называется **устойчивой**. Если же возникают колебания со все возрастающей амплитудой или происходит монотонное увеличение ошибки  $e$ , то система называется **неустойчивой**.

Для того, чтобы определить, устойчива система или нет, используются критерии устойчивости:

- 1) корневой критерий,
- 2) критерий Стодолы,
- 3) критерий Гурвица,
- 4) критерий Найквиста,
- 5) критерий Михайлова и др.

Первые два критерия являются необходимыми критериями устойчивости отдельных звеньев и разомкнутых систем. Критерий Гурвица является алгебраическим и разработан для определения устойчивости

замкнутых систем без запаздывания. Последние два критерия относятся к группе частотных критериев, поскольку определяют устойчивость замкнутых систем по их частотным характеристикам. Их особенностью является возможность применения к замкнутым системам с запаздыванием, которыми является подавляющее большинство систем управления.

### 3.1.2 Корневой критерий.

Корневой критерий определяет устойчивость системы по виду передаточной функции. Динамической характеристикой системы, описывающей основные поведенческие свойства, является характеристический полином, находящийся в знаменателе передаточной функции. Путем приравнения знаменателя к нулю можно получить характеристическое уравнение, по корням которого определить устойчивость.

Корни характеристического уравнения могут быть как действительные, так и комплексные и для определения устойчивости откладываются на комплексной плоскости (см. рис. 1.34).

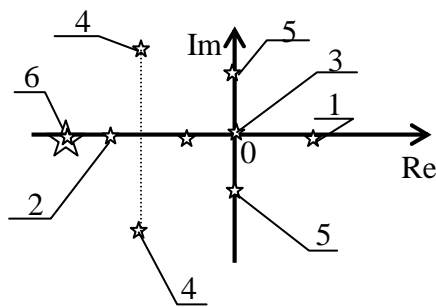


Рис. 1.34

(Символом \* обозначены корни уравнения).

Виды корней характеристического уравнения:

- Действительные:

- положительные (корень № 1);
- отрицательные (2);
- нулевые (3);

- Комплексные

- комплексные сопряженные (4);
- чисто мнимые (5);

По кратности корни бывают:

- одиночные (1, 2, 3);
- сопряженные (4, 5):  $s_i = \alpha \pm j\omega$ ;
- кратные (6)  $s_i = s_{i+1} = \dots$

Корневой критерий формулируется следующим образом:

Линейная АСР устойчива, если все корни характеристического уравнения лежат в левой полуплоскости. Если хотя бы один корень находится на мнимой оси, которая является границей устойчивости, то говорят, что система находится на границе устойчивости. Если хотя бы один корень находится в правой полуплоскости (не зависимо от числа корней в левой), то система является неустойчивой.

Иными словами, все действительные корни и действительные части комплексных корней должны быть отрицательны. В противном случае система неустойчива.

**Пример 3.1.** Передаточная функция системы имеет вид:

$$W(s) = \frac{3s + 4}{s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25}$$

Характеристическое уравнение:  $s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25 = 0$ .

Корни:  $s_1 = -1$ ;  $s_2 = -0,5 + j$ ;  $s_3 = -0,5 - j$ .

Следовательно, система устойчива. ♦

### 3.1.3 Критерий Стодолы.

Этот критерий является следствием из предыдущего и формулируется следующим образом: Линейная система устойчива, если все коэффициенты характеристического полинома положительны.

То есть, для передаточная из примера 3.1 по критерию Стодола соответствует устойчивой системе.

### 3.1.4 Критерий Гурвица.

Критерий Гурвица работает с характеристическим полиномом замкнутой системы. Как известно, структурная схема АСР по ошибке имеет вид (см. рис.)

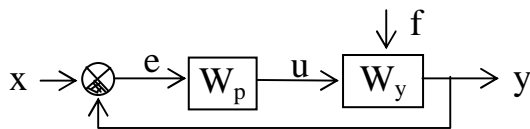


Рис. 1.35

$W_p$  - передаточная функция регулятора,  
 $W_y$  - передаточная функция объекта управления.

Определим передаточную функцию для прямой связи (передаточную функцию разомкнутой системы, см. п. 2.6.4):  $W_\infty = W_p W_y$ .

Далее с учетом наличия отрицательной обратной связи получаем передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_\zeta(s) = \frac{W_\infty}{1 + W_\infty}.$$

Как правило, передаточная функция разомкнутой системы имеет дробно-рациональный вид:

$$W_\infty(s) = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Тогда после подстановки и преобразования получаем:

$$W_\zeta(s) = \frac{B(s)}{A(s) + B(s)}.$$

Отсюда следует, что характеристический полином замкнутой системы (ХПЗС) можно определить как сумму числителя и знаменателя  $W_\infty$ :

$$D_3(s) = A(s) + B(s).$$

Для определения устойчивости по Гурвицу строится матрица таким образом, чтобы по главной диагонали были расположены коэффициенты ХПЗС с  $a_{n+1}$  по  $a_0$ . Справа и слева от нее записываются коэффициенты с индексами через 2 ( $a_0, a_2, a_4 \dots$  или  $a_1, a_3, a_5 \dots$ ). Тогда для устойчивой системы

необходимо и достаточно, чтобы определитель и все главные диагональные миноры матрицы были больше нуля.

Если хотя бы один определитель будет равен нулю, то система будет находиться на границе устойчивости.

Если хотя бы один определитель будет отрицателен, то система неустойчива не зависимо от числа положительных или нулевых определителей.

**Пример.** Дана передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\infty}(s) = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2} = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Требуется определить устойчивость замкнутой системы по критерию Гурвица.

Для этого определяется ХПЗС:

$$D(s) = A(s) + B(s) = 2s^4 + 3s^3 + s^2 + 2s^3 + 9s^2 + 6s + 1 = 2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1.$$

Поскольку степень ХПЗС равна  $n = 4$ , то матрица будет иметь размер  $4 \times 4$ . Коэффициенты ХПЗС равны  $a_4 = 2$ ,  $a_3 = 5$ ,  $a_2 = 10$ ,  $a_1 = 6$ ,  $a_0 = 1$ .

Матрица имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 2 & 10 & 1 \end{pmatrix}$$

(обратите внимание на сходство строк матрицы: 1 с 3 и 2 с 4). Определители:

$$\Delta_1 = 5 > 0,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 5 & 6 \\ 2 & 10 \end{vmatrix} = 5 * 10 - 2 * 6 = 38 > 0,$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 1 \\ 0 & 5 & 6 \end{vmatrix} = (5 * 10 * 6 + 6 * 1 * 0 + 2 * 5 * 0) - \\ - (0 * 10 * 0 + 5 * 5 * 1 + 2 * 6 * 6) = 209 > 0$$

$$\Delta_4 = 1 * \Delta_3 = 1 * 209 > 0.$$

Поскольку все определители положительны, то АСР устойчива. ♦

### 3.1.5 Критерий Михайлова.

Описанные выше критерии устойчивости не работают, если передаточная функция системы имеет запаздывание, то есть может быть записана в виде

$$W_{\infty}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-\tau s},$$

где  $\tau$  - запаздывание.

В этом случае характеристическое выражение замкнутой системы полиномом не является и его корни определить невозможно. Для определения устойчивости в данном случае используются частотные критерии Михайлова и Найквиста.

Порядок применения критерия Михайлова:

1) Записывается характеристическое выражение замкнутой системы:

$$D_3(s) = A(s) + B(s)e^{-\tau s}.$$

2) Подставляется  $s = j\omega$ :  $D_3(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega)$ .

3) Записывается уравнение годографа Михайлова  $D_3(j\omega)$  и строится кривая на комплексной плоскости.

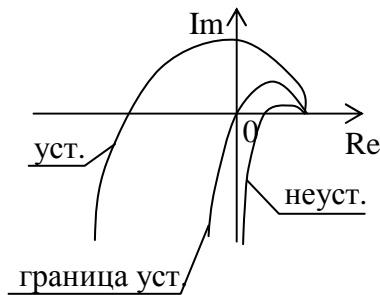


Рис. 1.36

Для устойчивой АСР необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова (см. рис.), начинаясь при  $\omega = 0$  на положительной вещественной полуоси, обходил последовательно в положительном направлении (против часовой стрелки) при возрастании  $\omega$  от 0 до  $\infty$   $n$  квадрантов, где  $n$  - степень характеристического полинома.

Если годограф Михайлова проходит через начало координат, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

### 3.1.6 Критерий Найквиста.

Данный критерий аналогичен критерию Михайлова, но работает с АФХ системы, поэтому более сложен для расчетов.

Последовательность:

1) Определяется передаточная функция разомкнутой системы  $W_{\infty}(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$ .

2) Определяется число правых корней  $m$ .

3) Подставляется  $s = j\omega$ :  $W_{\infty}(j\omega)$ .

4) Строится АФХ разомкнутой системы.

Для устойчивости АСР необходимо и достаточно, чтобы при увеличении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  АФХ  $W_{\infty}(j\omega)$   $m$  раз охватывала точку  $(-1; 0)$ , где  $m$  - число правых корней разомкнутой системы.

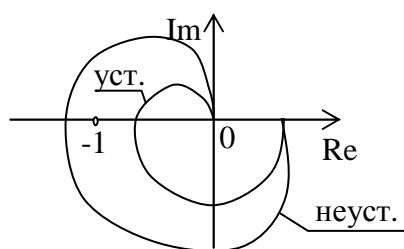


Рис. 1.37

Если АФХ проходит через точку  $(-1; 0)$ , то замкнутая система находится на границе устойчивости.

В случае, если характеристическое уравнение разомкнутой системы  $A(s) = 0$  корней не имеет (т.е.  $m = 0$ ), то критерий, согласно критерию, замкнутая система является устойчивой, если АФХ разомкнутой системы  $W_{\infty}(j\omega)$  не охватывала точку  $(-1; 0)$ , в противном случае система будет неустойчива (или на границе устойчивости).

### 3.2. Показатели качества

Если исследуемая АСР устойчива, то может возникнуть вопрос о том, насколько качественно происходит регулирование в этой системе и удовлетворяет ли оно технологическим требованиям. На практике качество регулирования может быть определено визуально по графику переходной кривой, однако, имеются точные методы, дающие конкретные числовые значения.

Показатели качества разбиты на 4 группы:

- 1) прямые - определяемые непосредственно по кривой переходного процесса,
- 2) корневые - определяемые по корням характеристического полинома,
- 3) частотные - по частотным характеристикам,
- 4) интегральные - получаемые путем интегрирования функций.

#### 3.2.1 Прямые показатели качества.

К ним относятся: степень затухания  $\psi$ , перерегулирование  $\sigma$ , статическая ошибка  $e_{ст}$ , время регулирования  $t_p$  и др.

Предположим, переходная кривая, снятая на объекте, имеет колебательный вид (см. рис. 1.38).

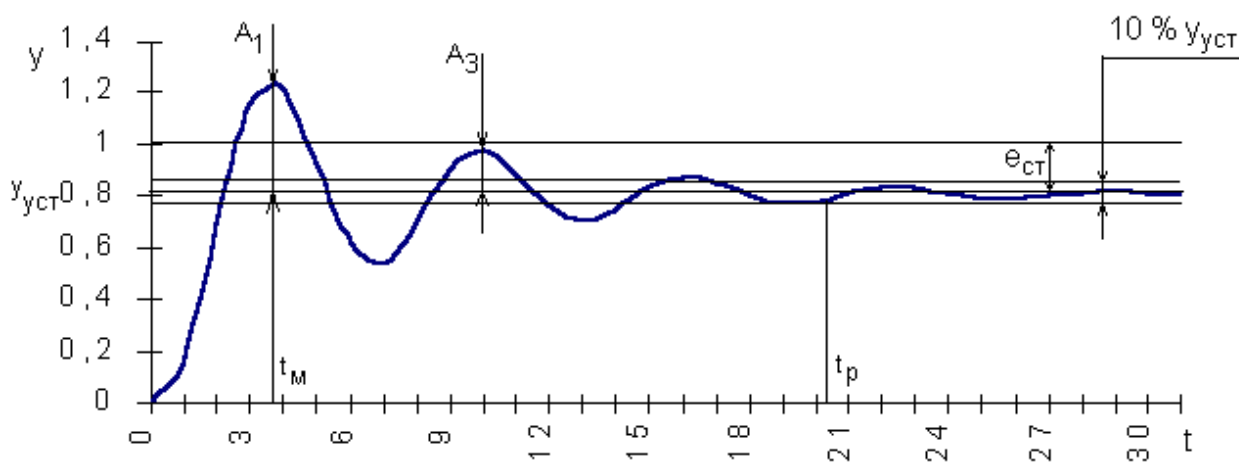


Рис. 1.38

Сразу по ней определяется установившееся значение выходной величины  $u_{уст}$ .

Степень затухания  $\psi$  определяется по формуле

$$\Psi = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

где  $A_1$  и  $A_3$  - соответственно 1-я и 3-я амплитуды переходной кривой.

Перерегулирование  $\sigma = \frac{A_1}{y_{\text{оно}}} = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{оно}}}{y_{\text{оно}}}$ , где  $y_{\text{max}}$  - максимум переходной кривой.

Статическая ошибка  $e_{ст} = x - u_{уст}$ , где  $x$  - входная величина.

Время достижения первого максимума  $t_m$  определяется по графику.

Время регулирования  $t_p$  определяется следующим образом: Находится допустимое отклонение  $\Delta = 5\% u_{уст}$  и строится «трубка» толщиной  $2\Delta$ . Время  $t_p$  соответствует последней точке пересечения  $y(t)$  с данной границей. То есть время, когда колебания регулируемой величины перестают превышать 5 % от установившегося значения.

### 3.2.2 Корневые показатели качества.

К ним относятся: степень колебательности  $m$ , степень устойчивости  $\eta$  и др.

Не требуют построения переходных кривых, поскольку определяются по корням характеристического полинома. Для этого корни полинома откладываются на комплексной плоскости и по ним определяются:

Степень устойчивости  $\eta$  определяется как граница, правее которой корней нет, т.е.

$$\eta = \min |\operatorname{Re}(s_i)|,$$

где  $\operatorname{Re}(s_i)$  - действительная часть корня  $s_i$ .

Степень колебательности  $m$  рассчитывается через угол  $\gamma$ :  $m = \operatorname{tg} \gamma$ . Для определения  $\gamma$  проводятся два луча, которые ограничивают все корни на комплексной плоскости.  $\gamma$  - угол между этими лучами и мнимой осью. Степень колебательности может быть определена также по формуле:

$$m = \min \left| \frac{\operatorname{Re}(s_i)}{\operatorname{Im}(s_i)} \right|.$$

### 3.2.3 Частотные показатели качества.

Для определения частотных показателей качества требуется построение АФХ разомкнутой системы и АЧХ замкнутой системы.

По АФХ определяются запасы:  $\Delta A$  - по амплитуде,  $\Delta \varphi$  - по фазе.

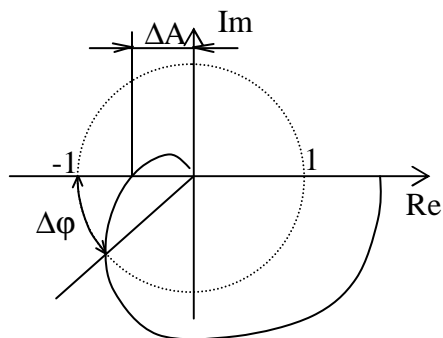


Рис. 1.39

Запас  $\Delta A$  определяется по точке пересечения АФХ с отрицательной действительной полуосью.

Для определения  $\Delta\varphi$  строится окружность единичного радиуса с центром в начале координат. Запас  $\Delta\varphi$  определяется по точке пересечения с этой окружностью.

По АЧХ замкнутой системы определяются **показатели колебательности** по заданию  $M$  и ошибке  $M_E$  как максимумы соответственно АЧХ по заданию и АЧХ по ошибке.

### 3.2.4 Связи между показателями качества.

Описанные выше показатели качества связаны между собой определенными соотношениями:

$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m}; \quad t_p = \frac{3}{\eta}; \quad \Psi = 1 - M^{-\frac{\pi}{m}}; \quad M = \frac{m^2 + 1}{2m}.$$

## 4. Настройка регуляторов.

### 4.1. Типы регуляторов.

Для регулирования объектами управления, как правило, используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев:

1) П-регулятор (пропорциональный регулятор)

$$W_{\text{П}}(s) = K_1.$$

Принцип действия заключается в том, что он вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка  $e$ , тем больше управляющее воздействие  $u$ ).

2) И-регулятор (интегрирующий регулятор)

$$W_{\text{И}}(s) = \frac{K_0}{s}.$$

Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

3) Д-регулятор (дифференцирующий регулятор)

$$W_{\text{Д}}(s) = K_2 s.$$

Генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины:

$$u = K_2 \frac{de}{dt}.$$

На практике данные простейшие регуляторы комбинируются в регуляторы вида:



4) ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор)

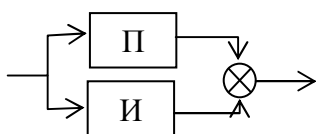


Рис. 1.40

$$W_{\text{ПИ}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s}.$$

5) ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный регулятор)

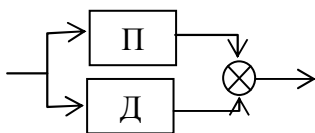


Рис. 1.41

$$W_{\text{ПД}}(s) = K_1 + K_2 s.$$

6) ПИД-регулятор.

$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s} + K_2 s.$$

Наиболее часто используется ПИД-регулятор, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов.

#### 4.2. Определение оптимальных настроек регуляторов.

Регулятор, включенный в АСР, может иметь несколько настроек, каждая из которых может изменяться в достаточно широких пределах. При этом при определенных значениях настроек система будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию.

Поэтому стоит задача определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные.

Оптимальными настройками регулятора называются настройки, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества. Требования к показателям качества устанавливаются непосредственно, исходя из технологических. Чаще всего накладываются требования на время регулирования (минимум) и степень затухания ( $\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$ ).

Однако, изменяя настройки таким образом, чтобы увеличить степень затухания, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы с большим значением  $\Psi$ .

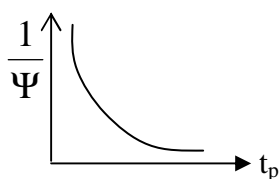


Рис. 1.42

Зависимость  $\Psi$  от  $t_p$  в общем случае имеет вид, изображенный на графике (см. рис. 1.42).

Поэтому для определения оптимальных настроек разработан ряд математических методов, среди которых метод D-разбиения.

Кривой D-разбиения называется кривая в плоскости настроек регулятора, которая соответствует определенному значению какого-либо показателя качества.

Например, требуется обеспечить степень затухания  $\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$ . Имеется формула, связывающая  $\Psi$  со степенью колебательности  $m$ :  $\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$ . Далее строится кривая D-разбиения равной степени колебательности  $m$ . Последовательность построения:

- 1) Определяется ХПЗС  $D_3(s)$  с неизвестными настройками.
- 2) Делается подстановка  $s = j\omega - m\omega$  и разделение  $D_3(j\omega - m\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega)$ .
- 3) Полученное выражение приравнивается к нулю и получается система

$$\begin{cases} \text{Re}(\omega) = 0 \\ \text{Im}(\omega) = 0 \end{cases}$$

Данная система имеет несколько неизвестных:  $\omega$  и настройки регулятора.

- 4) Далее, изменяя  $\omega$  от 0 до  $\infty$  эта система решается относительно настроек регулятора.
- 5) По полученным данным строится кривая, по которой определяются оптимальные настройки.

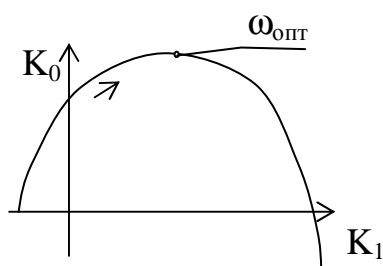


Рис. 1.43

Например, для ПИ-регулятора кривая D-разбиения может иметь вид представленный на рисунке 1.43.

Оптимальные настройки соответствуют максимальному значению  $K_0$  (для ПИ- и ПИД-регуляторов) или  $K_1$  (для ПД-регулятора).

## ЧАСТЬ 2. СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ.

### 1. Измерения технологических параметров.

#### 1.1. Государственная система приборов (ГСП).

ГСП объединяет в себе все средства контроля и регулирования технологических процессов. Характерной особенностью ГСП является:

- 1) блочно-модульный принцип, лежащий в основе конструкций устройств;
- 2) унификация входных-выходных сигналов и сигналов питания.

Содержит три ветви:

- 1) гидравлическую,
- 2) пневматическую,
- 3) электрическую.

Блочно-модульный принцип характеризуется наличием отдельных модулей или блоков, выполняющих достаточно простую функцию. Этот принцип позволяет уменьшить номенклатуру средств автоматизации, упрощает ремонт и замену, уменьшает стоимость, позволяет реализовать принцип взаимозаменяемости.

Унифицированные сигналы:

- 1) Пневматические - сигналы давления сжатого воздуха

диапазон изменения сигнала:  $0,2 - 1 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}^2}$  или  $0,02 - 0,1 \text{ МПа}$ ;

сигнал питания:  $1,4 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}^2}$ ;

расстояние передачи сигнала: до 300 м.

- 2) Электрические сигналы имеют много диапазонов, которые можно разделить на две группы:

а) токовые (сигналы постоянного тока), например:

0 - 5 мА, 0 - 20 мА, 4 - 20 мА и др.;

б) сигналы напряжения постоянного тока, например: 0 - 1 В, 0 - 10 В и др.

Первичные приборы (датчики) могут преобразовывать измеряемый параметр в какой-либо унифицированный сигнал. Если же датчик выдает не унифицированный сигнал, то для приведения его к стандартному диапазону должен быть установлен соответствующий преобразователь.

#### 1.2. Точность преобразования информации.

**Прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных.

**Косвенное измерение** - измерение, при котором искомое значение величины находят на основании зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми, прямым измерениям.

**Принцип измерений** – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

**Метод измерений** – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

**Средство измерений** – техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

**Мера** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

**Измерительный прибор** – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

**Аналоговый измерительный прибор** – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины.

**Цифровой измерительный прибор** – измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

**Показывающий измерительный прибор** – измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний.

**Показания средства измерений** – измерение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины.

**Градуировочная характеристика средства измерений** – зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы.

**Диапазон показаний** – область значений шкалы, ограниченная конечными и начальными значениями шкалы.

**Диапазон измерений** – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений.

**Предел измерений** – наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений.

**Чувствительность измерительного прибора** – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Любые измерения сопровождаются погрешностями:

- 1) **случайные погрешности** - имеют случайную природу и причина их неизвестна;
- 2) **промахи** - вызваны неправильными отсчетами по прибору;
- 3) **систематические** - обусловлены несовершенством методов определения, конструкции прибора.

Виды погрешностей:

- 1) **абсолютные**:  $\Delta X = X - X_0$ ,

где  $X$  - измеренное значение параметра,  $X_0$  - истинное значение;

Абсолютная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

2) **относительные**:  $\gamma = \frac{\Delta\tilde{O}}{\tilde{O}_0} 100\%$  (выраженные в %-ах);

Относительная погрешность измерения – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины. Относительная погрешность может быть выражена в процентах.

3) **приведенные**:  $\gamma = \frac{\Delta\tilde{O}}{\tilde{O}_{\max} - \tilde{O}_{\min}} 100\%$ ,

где  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  - минимальное и максимальное значения измеряемой величины.

Максимальная приведенная погрешность называется **классом точности**:

$$\gamma = \frac{\Delta\tilde{O}_{\max}}{\tilde{O}_{\max} - \tilde{O}_{\min}} 100\% .$$

В зависимости от класса точности приборы делятся на эталонные (образцовые) и рабочие.

### **1.3. Классификация КИП.**

На нефтеперерабатывающих и химических производствах наиболее часто измеряемыми величинами являются температура, давление, расход и уровень. На них приходится около 80 % всех измерений. Остальную часть занимают электрические, оптические и др. измерения.

При измерениях используются различные измерительные приборы, которые классифицируются по ряду признаков. Общей градацией является разделение их на приборы для измерения: механических, электрических, магнитных, тепловых и других физических величин.

Классификация по роду измеряемой величины указывает, какую физическую величину измеряет прибор (давление  $P$ , температуру  $T$ , расход  $F$ , уровень  $L$ , количество вещества  $Q$  и т.д.).

Исходя из признака преобразования измеряемой величины, измерительные приборы разделяют на приборы:

- а) непосредственной оценки;
- б) сравнения.

По характеру измерения: стационарные и переносные.

По способу отсчета измеряемой величины: показывающие, регистрирующие, суммирующие.

### **1.4. Виды первичных преобразователей.**

**Первичные приборы** или **первичные преобразователи** предназначены для непосредственного преобразования измеряемой величины в другую величину, удобную для измерения или использования. Различают генераторные, параметрические и механические преобразователи:

1) **Генераторные** осуществляют преобразование различных видов энергии в электрическую, то есть они генерируют электрическую энергию

(термоэлектрические, пьезоэлектрические, электрокинетические, гальванические и др. датчики).

- 2) К **параметрическим** относятся реостатные, тензодатчики, термосопротивления и т.п. Им для работы необходим источник энергии.
- 3) Выходным сигналом **механических** первичных преобразователей (мембранных, манометров, дифманометров, ротаметров и др.) является усилие, развиваемое чувствительным элементом под действием измеряемой величины.

## **1.5. Методы и приборы для измерения температуры.**

### **1.5.1 Классификация термометров.**

**Температура вещества** - величина, характеризующая степень нагретости, которая определяется внутренней кинетической энергией теплового движения молекул. Измерение температуры практически возможно только методом сравнения степени нагретости двух тел.

Для сравнения нагретости этих тел используют изменения каких-либо физических свойств, зависящих от температуры и легко поддающихся измерению.

По свойству термодинамического тела, используемого для измерения температуры, можно выделить следующие типы термометров:

- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения жидких тел;
- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения твердых тел;
- термометры газовые манометрические;
- термометры жидкостные манометрические;
- конденсационные;
- электрические;
- термометры сопротивления;
- оптические монохроматические пирометры;
- оптические цветные пирометры;
- радиационные пирометры.

### **1.5.2 Термометры расширения. Жидкостные стеклянные.**

Тепловое расширение жидкости характеризуется сравнительным **коэффициентом объемного расширения**, значение которого определяется как

$$\beta_{t_1, t_2} = \frac{V_{t_1} - V_{t_2}}{V_0(t_2 - t_1)}, \text{ 1/град,}$$

где  $V_0$ ,  $V_{t_1}$ ,  $V_{t_2}$  - объемы жидкости при  $0^\circ\text{C}$ , температурах  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Чувствительность термометра зависит от разности коэффициентов объемного расширения термометрической жидкости и стекла, от объема

резервуара и диаметра капилляра. Чувствительность термометра обычно лежит в пределах 0,4...5 мм/°С (для некоторых специальных термометров 100...200 мм/°С).

Для защиты от повреждений технические термометры монтируются в металлической оправе, а нижняя погружная часть закрывается металлической гильзой.

### **1.5.3 Термометры, основанные на расширении твердых тел.**

К этой группе приборов относятся дилатометрические и биметаллические термометры, основанные на изменении линейных размеров твердых тел с изменением температуры.

1) Конструктивное исполнение дилатометрических термометров основано на преобразовании измеряемой температуры в разность абсолютных значений удлинений двух стержней, изготовленных из материалов с существенно различными термическими коэффициентами линейного расширения:

$$\beta_{t_1, t_2} = \frac{l_{t_1} - l_{t_2}}{l_0(t_2 - t_1)}, \text{ 1/град,}$$

где  $l_0$ ,  $l_{t_1}$ ,  $l_{t_2}$  - линейные размеры тела при 0 °С, температурах  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

В силу того, что  $\Delta\beta$  мала, дилатометрические термометры применяются в качестве различного рода тепловых реле в устройствах сигнализации и регулирования температуры.

2) Биметаллические термометры основаны на деформации биметаллической ленты при изменении температуры. Обычно применяются биметаллические ленты, согнутые в виде плоской или винтовой спирали. Один конец спирали укреплен неподвижно, второй - на оси стрелки. Угол поворота стрелки равен углу закручивания спирали, который пропорционален изменению температуры.

Биметаллические термометры обеспечивают изменение температуры с относительными погрешностями 1 - 1,5 %.

### **1.5.4 Газовые манометрические термометры.**

В основу принципа действия манометрического термометра положена зависимость между температурой и давлением термометрического (рабочего) вещества, лишенного возможности свободно расширяться при нагревании.

Манометрические термометры обычно включают в себя термобаллон, капиллярную трубку и трубчатую пружину с поводком, зубчатым сектором и стрелкой. Вся система заполняется рабочим веществом. При нагревании термобаллона, установленного в зоне измеряемой температуры, давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической пружиной, которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора.

Газовые манометрические термометры основаны на зависимости температуры и давления газа, заключенного в герметически замкнутой термосистеме.

Достоинства: шкала прибора практически равномерна.

Недостатки: сравнительно большая инерционность и большие размеры термобаллона.

### 1.5.5 Жидкостные манометрические термометры.

В качестве манометрической жидкости в приборах этого типа применяется метиловый спирт, ксилол, толуол, ртуть и т.д.

Жидкостные манометрические термометры имеют равномерную шкалу.

### 1.5.6 Конденсационные манометрические термометры.

Конденсационные манометрические термометры реализуют зависимость упругости насыщенных паров низкокипящей жидкости от температуры. Поскольку эти зависимости для используемых жидкостей (хлористый метил, этиловый эфир, хлористый этил, ацетон и др.) нелинейны, следовательно, и шкалы термометров неравномерны. Однако, эти приборы обладают более высокой чувствительностью, чем газовые жидкостные.

### 1.5.7 Электрические термометры.

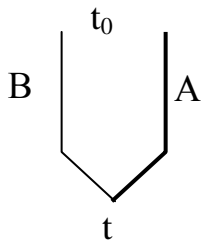


Рис. 2.1

Принцип действия этого типа термометров основан на зависимости термо-ЭДС (ТЭДС) цепи от изменения температуры.

В термоэлектрической цепи, состоящей из двух проводников А и В (см. рис. 2.1) возникают 4 различные ТЭДС: 2 ТЭДС в местах спаев проводников А и В, ТЭДС на конце проводника А и ТЭДС на конце проводника В. Суммарная ТЭДС, возникающая при нагреве спаев проводников до температур  $t$  и  $t_0$ :

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0),$$

где  $e_{BA}$  и  $e_{AB}$  - ТЭДС, обусловленная контактной разностью потенциалов и разностью температур концов А и В.

ТЭДС  $E_{AB}(t, t_0)$  является функцией от температуры горячего спая  $t$  при условии постоянства температуры холодного спая  $t_0$ .

Термопары градуируются при определенной постоянной температуре  $t_0$  (обычно  $t_0 = 0$  °С или 20 °С). При измерениях температура  $t_0$  может отличаться от градуировочного значения. В этом случае вводится соответствующая поправка в результат измерения:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') + E_{AB}(t_0', t_0).$$

Поправка  $E_{AB}(t_0', t_0)$  равна ТЭДС, которую развивает данная термопара при температуре горячего спая  $t_0'$  и градуировочном значении температуры



холодных спаев. Поправка берется положительной, если  $t_0' > t_0$  и отрицательной, если  $t_0' < t_0$ .

Величина поправки может быть взята из градуировочной таблицы.

*Конструктивное* исполнение термопар разнообразно и зависит главным образом от условий их применения. При необходимости измерения небольшой разницы температур или получения большой ТЭДС применяются дифференциальные термопары и термобатареи, представляющие собой несколько последовательно соединенных термопар.

*Компенсация* изменения температуры холодных спаев термопар. Правильное измерение температуры возможно лишь при постоянстве температур свободных спаев  $t_0$ . Оно обеспечивается с помощью соединительных проводов и специальных термостатирующих устройств. Соединительные провода в данном случае предназначены для переноса свободных концов термопары в зону с известной постоянной температурой, а также для подсоединения свободных концов термопары к зажимам измерительных приборов. Соединительные провода должны быть термоэлектрически подобны термоэлектродам термопары.

Как правило, соединительные провода для термопар, изготовленных из неблагородных металлов, выполняются из тех же самых материалов, что и термоэлектроды. Исключение составляет хромель-алюмелевая термопара, для которой с целью уменьшения сопротивления линии в качестве соединительных проводов применяется медь в паре с константаном.

*Градуировки* термопар: **ХА** - хромель-алюмелевые; **ХК** - хромель-копелевые;

**ПП** - платинородий-платиновые и т.д.

Требования к термопарам:

- 1) воспроизводимость,
- 2) высокая чувствительность,
- 3) надежность,
- 4) стабильность,
- 5) достаточный температурный диапазон.

Таблица 2.1 - Материалы, используемые для изготовления термопар.

Название	Состав	ТЭДС, мВ (при $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Максимальный темпер. предел, $^{\circ}\text{C}$
хромель	10% Cr + 90 % Ni	+2,95	1000
платинородий	90 % Pt + 10 % Rh	+0,86	1300
медь	Cu	+0,76	350
платина	Pt	0	1300
алюмель	95 % Ni + 5 % Al	-1,2	1000
копель	56 % Cu + 44 % Ni	-4	600
константан	60 % Cu + 40 % Ni	-3,4	600

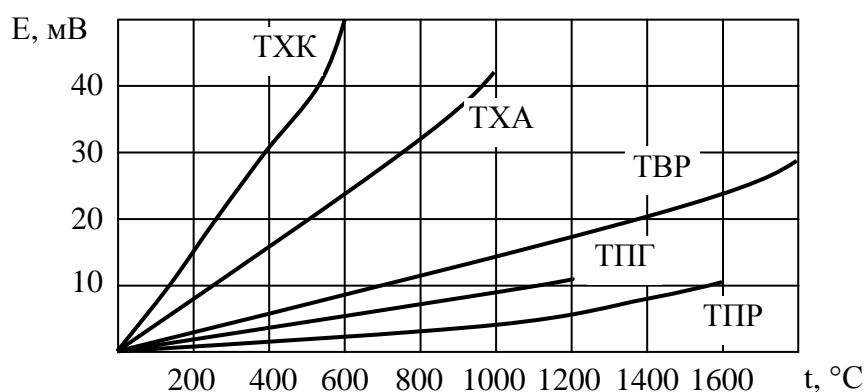


Рис. 2.2 – Градуировочные характеристики термопар

Методы и средства для измерения ТЭДС:

- 1) Метод непосредственной оценки (с помощью милливольтметра);
- 2) Компенсационный метод (с помощью потенциометров).

### **1.5.8 Термометры сопротивления.**

Измерение температуры термосопротивлениями основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Вид функции  $R = f(t)$  зависит от природы материала. Для изготовления чувствительных элементов серийных термосопротивлений применяются чистые металлы, к которым предъявляются следующие требования:

- а) металл не должен окисляться или вступать в химические реакции с измеряемой средой;
- б) температурный коэффициент электрического сопротивления металла  $\alpha$  должен быть достаточно большим и неизменным;
- в) функция  $R = f(t)$  должна быть однозначна.

Наиболее полно указанным требованиям отвечают: платина, медь, никель, железо и др.

Основной недостаток термосопротивлений: большая инерционность (до 10 мин.).

Для измерения температуры наиболее часто применяются термосопротивления типов ТСП (платиновые) и ТСМ (медные).

### **1.5.9 Пирометры излучения.**

Пирометры излучения основаны на использовании теплового излучения нагретых тел. Верхний предел измерения температуры пирометра излучения практически не ограничен. Измерение основано на бесконтактном способе, поэтому отсутствует искажение температурного поля, вызываемого введением преобразовательного элемента прибора в измеряемую среду. Возможно измерение температуры пламени и высоких температур газовых потоков при больших скоростях.

Лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. При сравнительно низких температурах (до 500 °С) нагретое тело испускает инфракрасные лучи. По мере повышения температуры цвет тела от темно-красного доходит до белого. Возрастание интенсивности монохроматического излучения с повышением температуры описывается соответствующими уравнениями.

### **1.5.10 Цветовые пирометры.**

В цветовых пирометрах определяется отношение интенсивности излучения реального тела  $E_\lambda$  в лучах с двумя заранее выбранными значениями длины волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , то есть показания цветовых пирометров определяется функцией  $f(E_{\lambda_1} / E_{\lambda_2})$ . Это отношение для каждой температуры различно, но однозначно.

## **1.6. Вторичные приборы для измерения разности потенциалов.**

Для измерения ТЭДС в комплектах термоэлектрических термометров применяются пирометрические милливольтметры и потенциометры. В потенциометрах, в отличие от милливольтметров, используется компенсационный метод измерения.

### **1.6.1 Пирометрические милливольтметры.**

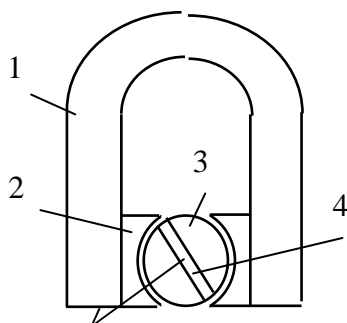


Рис. 2.3

Пирометрические милливольтметры являются электро-измерительными приборами магнито-электрической системы.

В конструкции пирометрических милливольтметров можно выделить магнитную и подвижную системы. Первая состоит из подковообразного магнита 1, полюсных наконечников 2 и цилиндрического сердечника 3. Кольцевой зазор между сердечником и полюсными наконечниками характеризуется наличием практически равномерного электромагнитного поля.

В этом зазоре соосно с сердечником размещается рамка 4, которая монтируется на кернах, опирающихся на подпятники, либо на натянутых нитях. Момент сил, противодействующий вращению рамки создается специальными пружинами.

Взаимодействие тока, протекающего по рамке с полем постоянного магнита 2 вызывает появление вращающего момента, который, будучи уравновешен противодействующим моментом пружин, поворачивает рамку на определенный угол. Этот угол пропорционален величине протекающего по рамке тока.

### 1.6.2 Потенциометры.

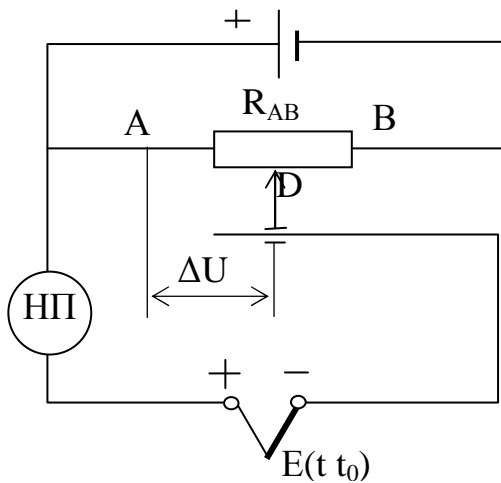


Рис. 2.4

Потенциометры в отличие от милливольтметров работают по компенсационному (нулевому) методу измерения.

Принцип компенсации при измерении ТЭДС заключается в уравнивании ее известным напряжением  $\Delta U$  на калибровочном резисторе  $R_{AB}$ , созданным вспомогательным источником тока. Ток от вспомогательного источника проходит через реохорд  $R_{AB}$ .  $U_{AB}$  пропорционально  $R_{AB}$  (в точке D находится движок реохорда).

Последовательно с термопарой, генерирующей ТЭДС, включен милливольтметр НП (нуль-прибор) с нулем в середине шкалы. Передвигая движок D, добиваются уравнивания  $\Delta U$  и  $E(t_0)$ .

### 1.6.3 Автоматические электрические потенциометры.

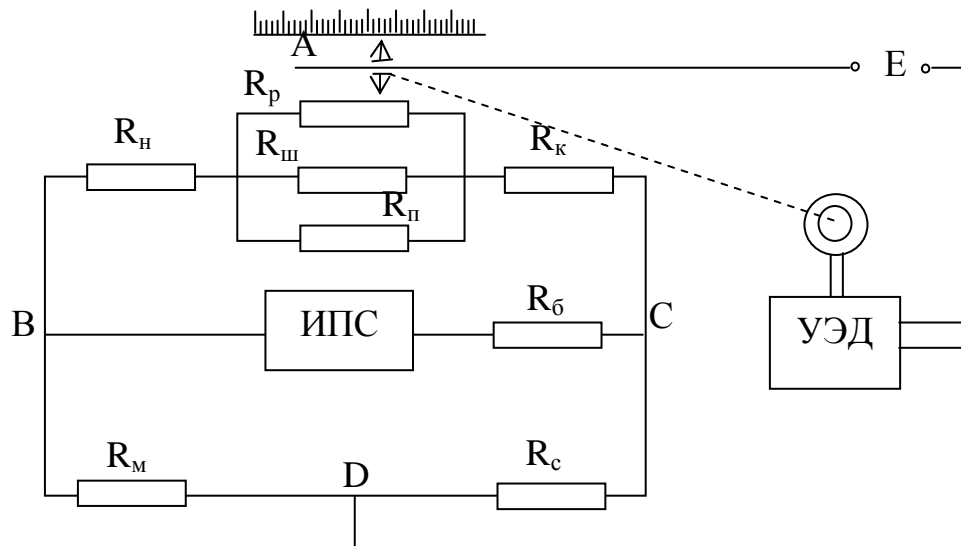


Рис. 2.5

Схема автоматического потенциометра показана на рис. 2.5, где обозначено:

- $R_p$  - сопротивление реохорда,
- $R_{ш}$  - шунта,
- $R_{п}$  - для задания пределов измерения,
- $R_n$  и  $R_k$  - для задания начала и конца шкалы,
- $R_б$  - балластное,
- $R_c$  - для проверки рабочего тока,

$R_m$  - медное сопротивление для компенсации влияния температуры холодных спаев.

ИПС - источник питания стабилизированный.

Потенциометр состоит из моста сопротивлений ABCD, в одну из диагоналей которого включен источник питания ИПС (диагональ BC), а в другую (измерительную диагональ AD) термопара с ТЭДС  $E$  и электродвигатель ЭД с усилителем УЭД. В вершине А моста находится реохорд  $R_p$ , к движку которого прикреплена стрелка, движущаяся вдоль шкалы. Перемещением движка в свою очередь управляет электродвигатель.

Мост может находиться в двух состояниях: уравновешенном и неуравновешенном.

Когда мост находится в равновесии, то напряжение между его вершинами AD равно по модулю термоЭДС ( $U_{AD} = E$ ) и напряжение небаланса  $\Delta U$ , подаваемое на усилитель УЭД, равно нулю:

$$\Delta U = U_{AD} - E = 0.$$

В данном состоянии ЭД не работает.

Если по каким-либо причинам термо-ЭДС  $E$  изменится, то мост выходит из равновесия и на входе усилителя УЭД появится напряжение небаланса  $\Delta U \neq 0$ . Усилитель, усилив напряжение, подает его на ЭД, который, вращаясь, перемещает движок реохорда. перемещение движка продолжается до тех пор, пока мост снова не придет в равновесие и напряжение на ЭД снова не станет равно нулю.

В этих потенциометрах процесс компенсации осуществляется автоматически, непрерывно и с большой скоростью. Эти приборы имеют устройства для автоматического внесения поправки на температуру холодных спаев термопары.

### **1.7. Методы измерения сопротивления.**

Для измерения сопротивлений термоэлектрических сопротивлений (ТС) часто используют автоматические электронные мосты, включенные по двухпроводной, трехпроводной или четырехпроводной схемам.

Двухпроводная схема подключения моста к ТС показана на рис. 2.6, где обозначены:

$R_1, R_2, R_3, R_4$  - сопротивления моста;

$R_6$  - балластное сопротивление для ограничения рабочего тока;

$R_T$  - сопротивление ТС;

$R_n$  - сопротивление линии (соединительных проводов).

Условием равновесия моста является равенство произведений противоположных плечей, т.е. в данном случае:

$$R_1 \cdot R_3 \approx R_2 \cdot (R_4 + R_T + 2 \cdot R_n).$$

Когда мост уравновешен, напряжение на диагонали  $U_{AD} = 0$  и, следовательно, ЭД не работает. При изменении температуры объекта

изменяется  $R_T$  и  $U_{AD}$  перестает быть нулевым. Это напряжение усиливается УЭД и подается на ЭД, который, вращаясь, перемещает движок реохорда.

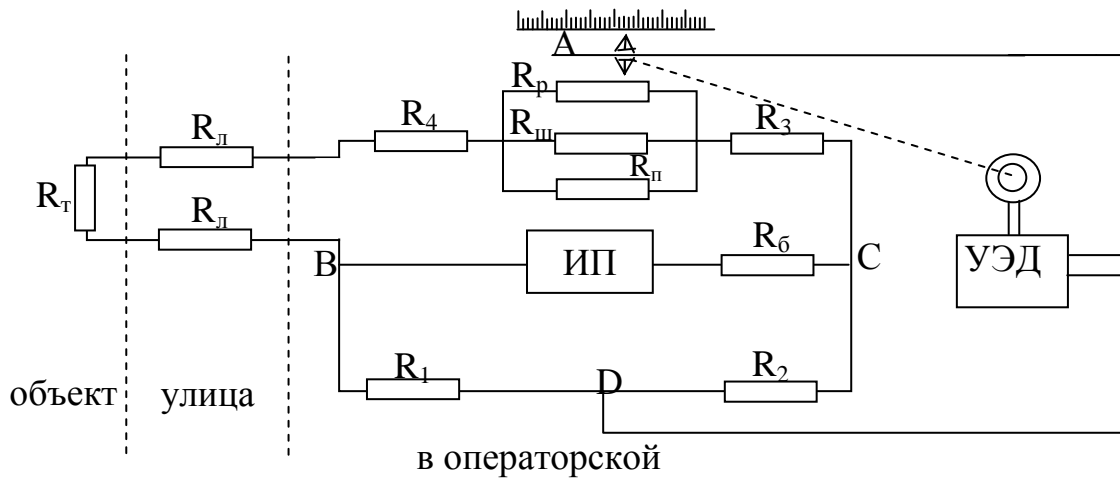


Рис. 2.6

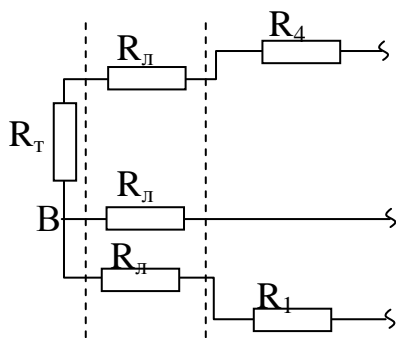


Рис. 2.7

Недостатком такой схемы является то, что сопротивления линии входят в одно плечо с  $R_T$ , следовательно, изменение  $R_{л}$  может вызывать изменение показаний моста. Для компенсации  $R_{л}$  применяются трехпроводная или четырехпроводная схемы.

Трехпроводная схема подключения моста (см. рис. 2.7).

В этом случае уравнение равновесия имеет вид:

$$(R_1 + R_{л}) \cdot R_3 \approx R_2 \cdot (R_4 + R_T + R_{л}).$$

То есть сопротивление линии  $R_{л}$  входит в обе части уравнения и частично компенсируется.

## 1.8. Методы и приборы для измерения давления и разряжения.

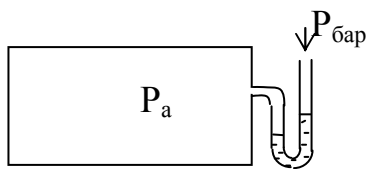
### 1.8.1 Классификация приборов для измерения давления.

Под давлением в общем случае понимают предел отношения нормальной составляющей усилия к площади, на которую действует усилие.

В зависимости от природы контролируемого процесса нас интересует абсолютное давление  $P_a$  или избыточное  $P_{и}$ . При измерении  $P_a$  за начало отсчета принимается нулевое давление, которое можно себе представить как давление внутри сосуда после полной откачки воздуха. Естественно, достигнуть  $P_a = 0$  невозможно.

**Барометрическое** давление  $P_{бар}$  - давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы.

**Избыточное** давление представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлениями:



Если  $P_{абс} < P_{бар}$ , то  $P_{и}$  называется давлением разряжения.

$$P_{и} = P_{а} - P_{бар}$$

Рис. 2.8

### Классификация приборов для измерения давления:

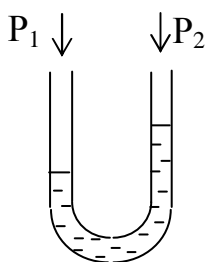
#### I. По принципу действия:

- 1) жидкостные (основанные на уравнивании давления столбом жидкости);
- 2) поршневые (измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень);
- 3) пружинные (давление измеряется по величине деформации упругого элемента);
- 4) электрические (основанные на преобразовании давления в какую-либо электрическую величину).

#### II. По роду измеряемой величины:

- 1) манометры (измерение избыточного давления);
- 2) вакуумметры (измерение давления разряжения);
- 3) мановакуумметры (измерение как избыточного давления, так и давления разряжения);
- 4) напорометры (для измерения малых избыточных давлений);
- 5) тягомеры (для измерения малых давлений разряжения);
- 6) тягонапорометры;
- 7) дифманометры (для измерения разности давлений);
- 8) барометры (для измерения барометрического давления).

#### 1.8.2 Жидкостные манометры.



Широко применяются в качестве образцовых приборов для лабораторных и технических измерений. В качестве рабочей жидкости используется спирт, вода, ртуть, масла.

Двухтрубный манометр представляет из себя U-образную трубку, заполненную затворной жидкостью.

Рис. 2.9

#### 1.8.3 Чашечные манометры и дифманометры.

Чашечный (однотрубный) манометр является разновидностью U-образного трубного манометра (см. рис. 2.10), у которого одна из трубок заменена сосудом большого диаметра (чашкой). Измеряется давление  $P_a$ , Действующее на жидкость в широком сосуде, а открытый конец трубки совмещен с атмосферой.

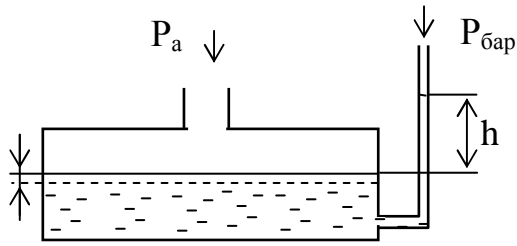


Рис. 2.10

Уравнение равновесия:  $P = \rho g (h + H)$ .

Чашечные и трубные манометры применяются для тарировки и поверки рабочих приборов, реже - в качестве рабочих приборов.

#### 1.8.4 Микроманометры.

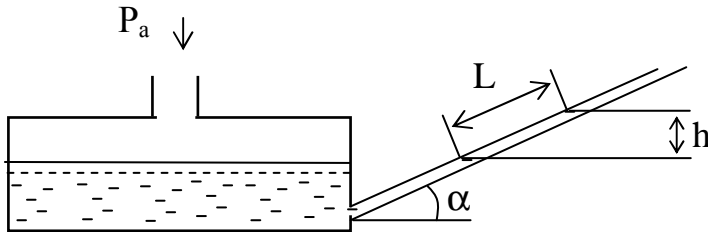


Рис. 2.11

Применяются для измерения давлений, меньших 100 - 200 мм водяного столба. Представляют из себя жидкостной манометр с наклоненной по углом 20...50° трубкой.

$h = L \sin(\alpha)$  - высота поднятия уровня жидкости в узкой трубке,

$P = \rho g h$  - измеренное давление.

Погрешность:  $\pm 1,5 \%$ .

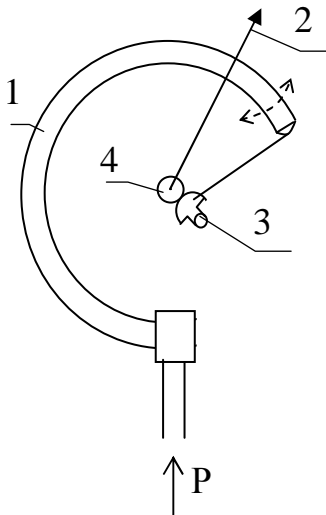


Рис. 2.12

#### 1.8.5 Пружинные манометры.

Состоят из трубчатой пружины 1 с поводком, зубчатого сектора 3 и шестерни 4 с прикрепленной к ней стрелкой 2.

При увеличении давления трубчатая пружина стремится разогнуться, в результате чего она через поводок начинает взаимодействовать на зубчатый сектор, отклоняя стрелку.

#### 1.8.6 Электрические манометры.

##### Преобразователи давления типа "Сапфир".

Эти манометры обеспечивают непрерывное преобразование значение измеряемого параметра (давления избыточного, абсолютного, разрежения, разности давлений нейтральных и агрессивных сред) в унифицированный токовый сигнал для дистанционной передачи (0 - 5 мА, 0 - 20 мА и др.).

Мембранный тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9 (см. рис. 2.13). Внутренняя полость 4 тензопреобразователя заполнена кремний-органической жидкостью и отделена от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9. Полость 10 сообщена с окружающей атмосферой.



Измеряемое давление подается в камеру 7 фланца 5, который уплотнен прокладкой 8. Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость воздействует на мембрану тензопреобразователя, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока 1 по проводам через гермовывод 2.

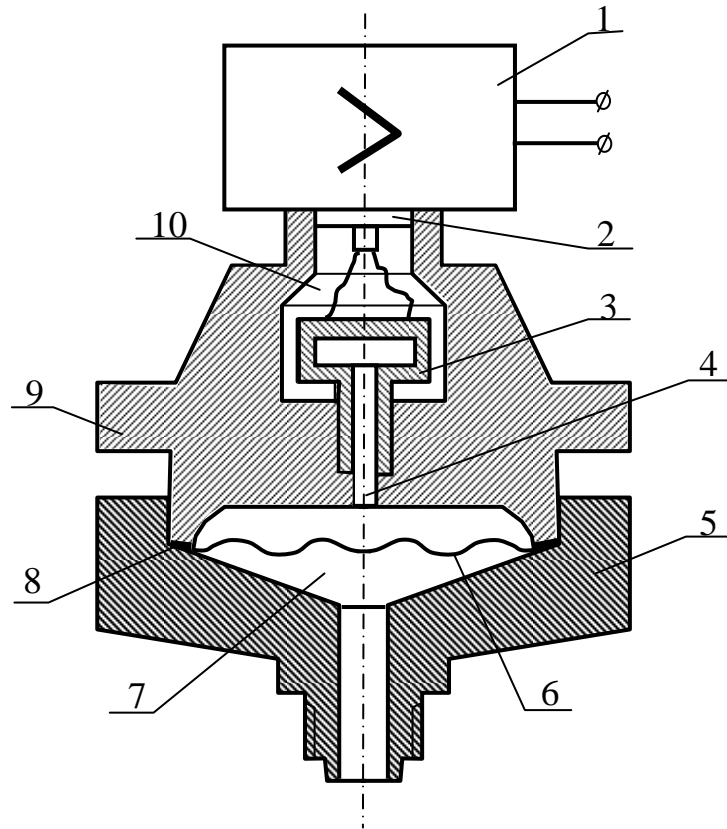


Рис. 2.13

Преобразователи Сапфир-22ДА моделей 2050 и 2060, предназначенные для измерения абсолютного давления, отличаются тем, что полость 10 вакуумирована и герметизирована.

Преобразователи Сапфир-22ДД моделей 2410, 2420, 2430, 2434, 2440 и 2444 (см. рис. 2.14), предназначенные для измерения разности давлений, отличаются тем, что в них используется тензопреобразователь мембранно-рычажного типа, который размещен внутри основания в замкнутой полости, заполненной кремнийорганической жидкостью, и отделен от измеряемой среды двумя металлическими гофрированными мембранами. Мембраны соединены между собой центральным штоком, перемещение которого передается рычагу тензопреобразователя, что вызывает деформацию тензопреобразователя. Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина из монокристаллического сапфира (разновидность корунда -  $Al_2O_3$ ) с кремниевыми пленочными тензорезисторами (структура КНС - кремний на сапфире).

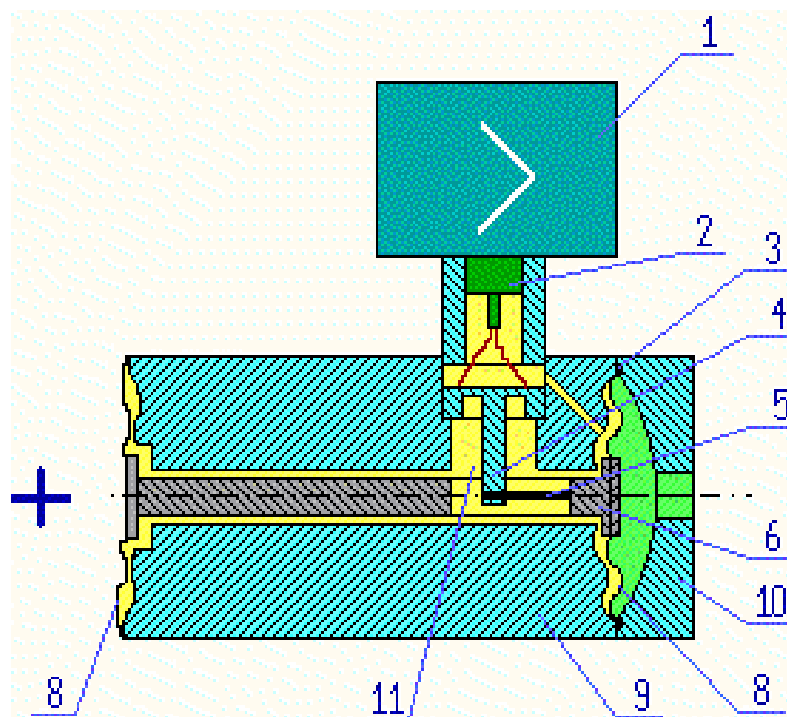


Рис. 2.14

Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронное устройство 1 по проводам через гермоввод 2. Измерительный блок выдерживает без разрушения воздействие односторонней перегрузки рабочим избыточным давлением. Это обеспечивается тем, что при такой перегрузке одна из мембран 8 ложится на профилированную поверхность основания 9.

## **1.9. Методы и приборы для измерения расхода пара, газа и жидкости.**

### **1.9.1 Классификация.**

**Количество вещества** выражается в единицах объема или массы (т.е. в м<sup>3</sup> или килограммах). Количество жидкости с равной степенью точности может быть измерено и объемным, и массовым методами, количество газа - только объемным. Для твердых и сыпучих материалов используется понятие насыпной или объемной массы, которая зависит от гранулометрического состава сыпучего материала. Для более точных измерений количество сыпучего материала определяется взвешиванием.

**Расходом вещества** называется количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени. Массовый расход измеряется в кг/с, объемный - в м<sup>3</sup>/с.

Приборы, измеряющие расход, называются **расходомерами**. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами-счетчиками. Такие приборы позволяют измерять расход и количество вещества.

### Классификация:

#### Механические

##### объемные

- ковшовые
- барабанного типа
- мерники

##### скоростные

- по методу переменного перепада давления
- по методу постоянного перепада давления
- напорные трубки
- ротационные

#### Электрические

- электромагнитные
- ультразвуковые
- радиоактивные

### 1.9.2 Метод переменного перепада давления.

Является самым распространенным и изученным методом измерения расхода жидкости, пара и газа.

В измерительной технике сужающими устройствами являются диафрагмы, сопла и сопла Вентури.

Наиболее часто из них применяются **диафрагмы**, которые представляют собой тонкий диск, установленный в трубопроводе так, чтобы его отверстие было концентрично внутренней контуре сечения трубопровода. Сужение потока начинается до диафрагмы. Затем на некотором расстоянии за ней благодаря действию сил инерции, поток сужается до минимального значения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней образуются зоны с вихревым движением.

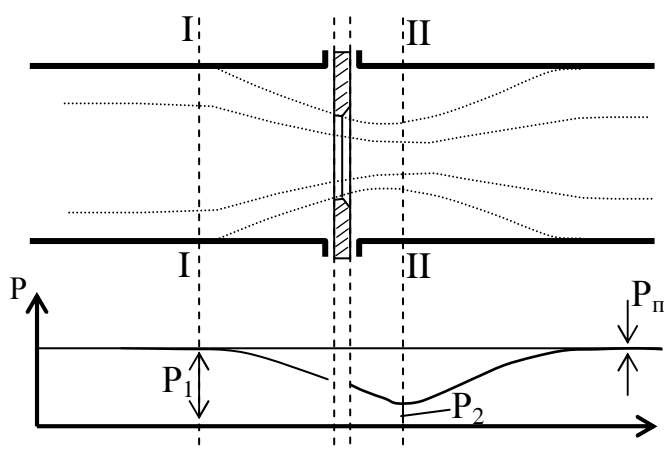


Рис. 2.15

I - I - сечение потока до искажения формы.

II - II - сечение в месте максимального сужения.

$P_{\text{п}}$  - потери давления на трение и завихрения.

Разность давлений  $P_1 - P_2$  зависит от расхода среды, протекающей через трубопровод.

В случае использования **сопла** струя, протекающая через него, не отрывается от его профилированной части и поэтому  $P_{\text{п}}$  меньше.

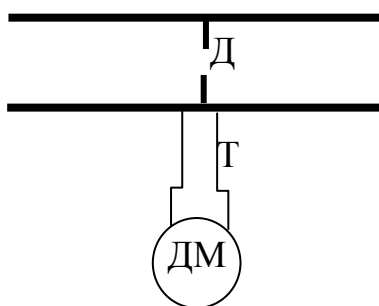


Рис. 2.16

Еще меньше потери  $P_n$  в сопле Вентури.

Перепад давления измеряется дифманометрами. Комплект расходомера состоит из элементов:

- 1) сужающее устройство (Д);
- 2) импульсные трубки (Т);
- 3) дифманометр (ДМ).

В качестве дифманометров обычно используются преобразователи разности давлений типа "Сапфир".

### 1.9.3 Расходомеры постоянного перепада давления.

К ним относятся гидродинамические, поршневые, поплавковые, ротаметрические расходомеры.

Наиболее распространенными приборами группы расходомеров постоянного перепада давления являются ротаметры (см. рис. 2.17), которые имеют ряд преимуществ перед расходомерами переменного перепада давления:

- а) потери  $P_n$  незначительны и не зависят от расхода;
- б) имеют большой диапазон измерения и позволяют измерять малые расходы.

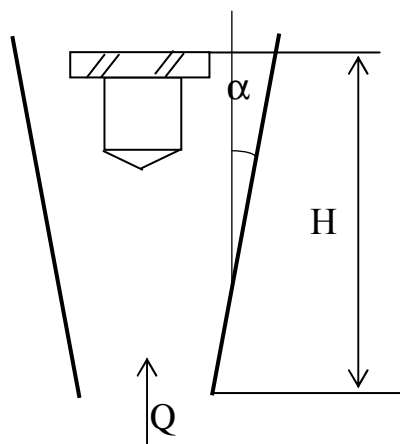


Рис. 2.17

Принцип действия основан на измерении положения  $H$  поплавка, вращающегося в расширяющейся кверху трубке под влиянием направленной вверх струи.

$Q$  - расход проходящего через трубку газа или жидкости,

$\alpha$  - угол наклона стенок трубки.

Зависимость  $H$  от  $Q$  нелинейна, но в начальном и среднем участках равномерность делений шкалы искажается в незначительной степени.

Отсутствие прямой зависимости между  $Q$  и  $H$  требует индивидуальной градуировки каждого прибора.

Ротаметрические трубки обычно изготавливаются из стекла, на которое наносится шкала. Ротор также может быть изготовлен в виде шарика или диска.

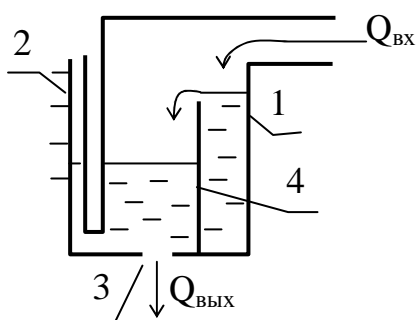


Рис. 2.18

### 1.9.4 Расходомеры переменного уровня.

Используются для измерения расходов смесей продуктов, содержащих твердые частицы, пульсирующих потоков, особо активных сред.

Измерения осуществляются при атмосферном давлении. Состоит из элементов (см. рис. 2.18): 1 - калиброванный сосуд, 2 - уровнемерное стекло, 3 - отверстие в днище, 4 - перегородка для успокоения потока.

### 1.9.5 Расходомеры скоростного напора.

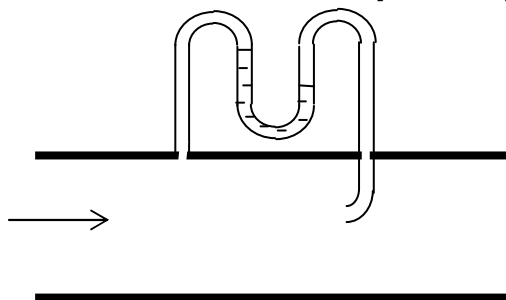


Рис. 2.19

Измерение расхода основано на зависимости динамического напора от скорости потока измеряемой среды.

Дифманометр, соединяющий обе трубки, показывает динамическое давление, по котором судят о скорости потока и, следовательно, о расходе.

## 1.10. Методы и приборы для измерения уровня.

### 1.10.1 Методы измерения уровня.

В общем объеме измерительных операций в нефтепереработке, нефтехимии и газовой промышленности измерение уровня составляет 18 - 20 %.

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной поверхности, принятой за начало отсчета. Приборы, выполняющие эту задачу, называются уровнемерами.

Методы измерения уровня: 1) поплавковый, 2) буйковый, 3) гидростатический, электрические и др.

### 1.10.2 Поплавковый метод измерения уровня.

Поплавковый уровнемер построен по принципу использования выталкивающей силы жидкости. Чувствительный элемент представляет собой тело произвольной формы (поплавок), плавающее на поверхности жидкости и имеющий постоянную осадку. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости и текущее значение уровня определяется фиксацией положения поплавка.

### 1.10.3 Буйковые уровнемеры.

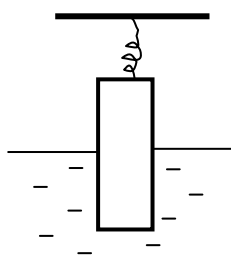


Рис. 2.20

Действие буйкового уровнемера основано на законе Архимеда. Чувствительный элемент буйкового уровнемера - буй - массивное тело, подвешенное вертикально внутри сосуда, уровень жидкости в котором контролируется. По мере изменения уровня жидкости изменяется погружение буя вследствие компенсации выталкивающей силы жидкости изменением усилия в подвеске.

Таким образом, по величине погружения буя судят об уровне жидкости в сосуде. Характеристика буйкового уровнемера линейная, а чувствительность тем больше, чем больше площадь поперечного сечения буя.

#### 1.10.4 Гидростатические уровнемеры.

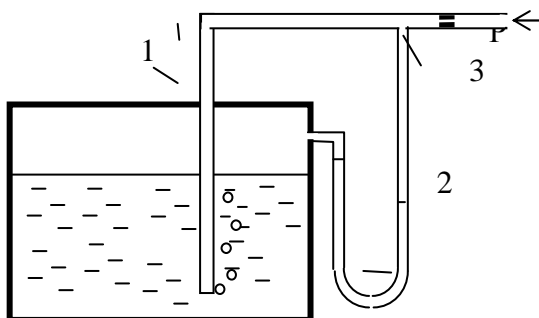


Рис. 2.21

В этих приборах измерение уровня жидкости постоянной плотности сводится к измерению давления, созданного столбом жидкости  $P = \rho_{ж} g h$ .

Различают пьезометрические уровнемеры и уровнемеры с непосредственным измерением столба жидкости.

**Пьезометрические уровнемеры** применяются для измерения уровня самых разнообразных, в том числе вязких и агрессивных жидкостей.

Воздух из пьезометрической трубки 1 барботирует через слой жидкости. Количество воздуха, подаваемого под давлением, ограничивается дросселем 3 таким образом, чтобы скорость движения его в трубопроводе была минимально возможной. Уровень жидкости определяется по разности давления в дифманометре 2.

#### 1.10.5 Электрические методы измерения уровня.

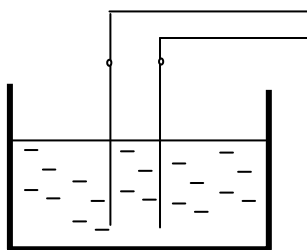


Рис. 2.22

Для измерения уровня жидкости может быть использовано различие электрических свойств жидкости и парогазовой смеси под ней. Под электрическими свойствами понимаются диэлектрическая проницаемость и электропроводность веществ.

**Кондуктометрический** метод измерения уровня основан на измерении электрической проводимости первичного преобразователя, зависящей от значения уровня.

**Емкостной** метод измерения основан на изменении емкости первичного преобразователя в зависимости от положения уровня измеряемой среды. Обычно первичный преобразователь выполняется в виде коаксиальных цилиндрических обкладок, погруженных в измеряемую жидкость. С изменением уровня жидкость заполняет пространство между обкладками и тем самым изменяет их электрическую емкость. Зависимость между уровнем жидкости и емкостью пропорциональная.

## 2. Исполнительные устройства.

### 2.1. Классификация исполнительных устройств.

**Исполнительным устройством** (ИУ) называется устройство в системе управления, непосредственно реализующее управляющее воздействие со стороны регулятора на объект управления путем механического перемещения **регулирующего органа** (РО) объекта.

Большинство управляющих воздействий в нефтепереработке, нефтедобыче и нефтехимии реализуется путем изменения расходов веществ (например, сырья, топлива, кубового остатка колонны и т.д.).

Уравнение статики ИУ для расхода  $F$  жидкости или газа может быть описано как

$$F = F(\Delta P, \nu, \rho, C_1, C_2, \dots),$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на РО,  $\nu$  – вязкость,  $\rho$  – плотность,  $C_i$  – некоторые параметры, зависящие от конструкции РО, режима истечения потока и т.д. Отсюда видно, что расход  $F$  может быть изменен путем:

- изменения  $\Delta P$  (насосные ИУ),
- $\nu$  или  $\rho$  (реологические ИУ),
- коэффициентами  $C_i$  (дроссельные ИУ).

### 2.2. Исполнительные устройства насосного типа.

Структура ИУ насосного типа представлена на рисунке, где обозначено:  $u$  – управляющее воздействие со стороны регулятора, ИМ – исполнительный механизм (привод), РО – регулирующий орган (насос),  $X_p$  – параметр, изменяющий производительность насоса (частота вращения вала, ход поршня и т.д.).

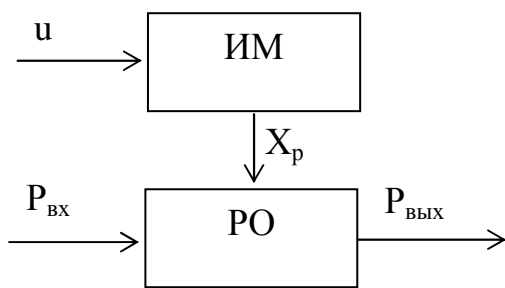


Рис. 2.23

Для данных ИУ, как правило, давление на выходе  $P_{\text{вых}}$  больше, чем давление на входе  $P_{\text{вх}}$ , а перепад давления на РО определяется как  $\Delta P = P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}$ .

Насосные ИУ делятся на три класса:

1) С **вращательным** движением РО:

а) **шестеренчатые** – зубья шестеренок создают со стенками корпуса множество объемов, посредством которых жидкость из всасывающей линии подается в нагнетательную; обратный ток жидкости существенно меньше, так как при зацеплении шестеренок между собой остаточные объемы невелики.

б) **шиберные** – при вращении шибера центробежными силами прижимаются к корпусу и образуют с ним переменные объемы: на всасывающей линии

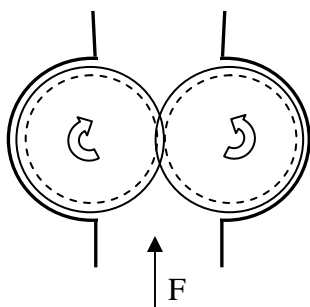


Рис. 2.24 - шестеренчатый насос

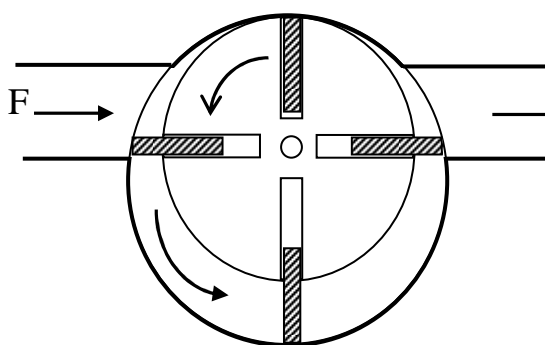


Рис. 2.25 - шиберный насос

увеличивающиеся, на нагнетательной – уменьшающиеся.

- в) **винтовые** – перекачка производится винтовым шнеком.  
 г) **центробежные** – изменение расхода происходит за счет изменения входной скорости в полости ротора насоса.
- 2) С **поступательным** движением РО:  
 а) **поршневые**,  
 б) **мембранные**,  
 в) **сильфонные**.

### 2.3. Исполнительные устройства реологического типа.

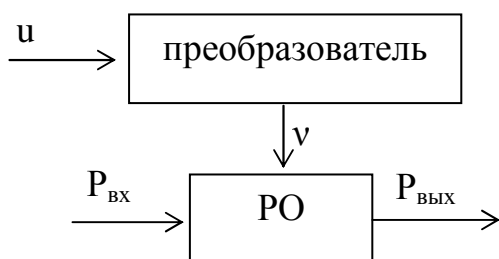


Рис. 2.26

Некоторые жидкости и дисперсионные системы могут изменять вязкость под действием электрического поля (например, вазелиновое, трансформаторное, касторовое масла, олефины, алюмосиликаты и др.), т.е.  $F = F(v)$ .

Преобразователь в ИУ данного типа осуществляет изменение электромагнитного поля в РО в зависимости от  $u$ , которое в свою очередь влияет на  $v$ . При этом расход  $F$  на РО изменяется пропорционально.

### 2.4. Исполнительные устройства дроссельного типа.

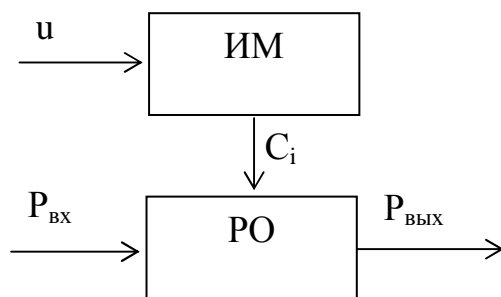


Рис. 2.27

Эти ИУ нашли преимущественное распространение в силу универсальности и простоты. В зависимости от  $u$  ИМ изменяет какой-либо параметр дросселя РО, что приводит к изменению расхода  $F$ .

Пропускной характеристикой дросселя называется зависимость расхода  $F$  от перепада давления  $\Delta P = P_{вх} - P_{вых}$ , положения РО и т.д.

Зависимость  $F(\Delta P)$  для турбулентного потока:

$$F = \gamma \sqrt{\Delta P},$$

где  $\gamma = S \sqrt{\frac{2}{\xi \rho}}$ ,  $S$  – площадь сечения потока,  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления,  $\rho$  – плотность.



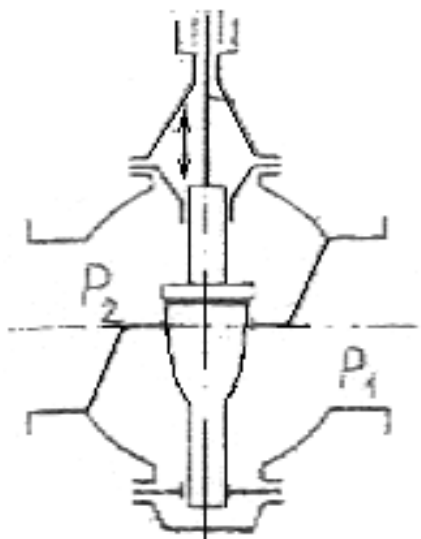


Рис. 2.28

Типы ИУ:

- 1) **Плунжерные** – расход регулируется путем изменения площади проходного сечения, образованного парой «седло-затвор» (см. рис.). Форма затвора подбирается таким образом, чтобы пропускная характеристика  $F = F(h)$  была линейна ( $h$  – положение штока).
- 2) **Шланговые** – расход регулируется сжиманием гибкого шланга (тип ПШУ-1).
- 3) **Диафрагмовые** – используют гибкие мембраны.
- 4) **Заслоночные** – используют заслонки в виде дисков, вращающихся в сечении трубопровода.
- 5) **Краны** – используют затворы, выполненные в виде цилиндра, усеченного конуса или сферы с проходным отверстием; расход регулируется поворотом затвора на определенный угол.
- 6) **Задвижки** – расход регулируется плоской задвижкой, перемещающейся перпендикулярно оси трубопровода.

### 2.5. Исполнительные механизмы.

Стандартные **исполнительные механизмы** (ИМ) работают в комплекте с РО, образуя вместе ИУ, и классифицируются по:

- виду энергии, создающей перестановочное усилие (электрические, пневматические, гидравлические и др.);
- виду движения (прямоходовые, однооборотные и многооборотные);
- принципу создания перестановочного усилия (мембранные, поршневые, сильфонные, лопастные, электромагнитные, электродвигательные и др.).

**Пневматические** ИМ нашли широкое распространение благодаря простоте конструкции, низкой стоимости, надежности, способности работать в пожаро- и взрывоопасных условиях. Недостатки: ограниченность расстояния от регулятора до места установки ИУ (обычно до 200 м), низкое быстродействие, низкий класс точности.

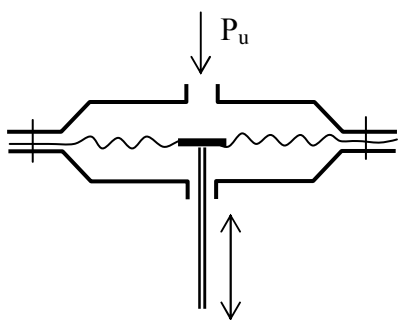


Рис. 2.29

Входным сигналом этих ИМ является давление сжатого воздуха, которое, воздействуя на мембрану, создает усилие

$$F = S_{\text{эф}} (P_u - P_o),$$

где  $P_u$  – управляющее давление,

$P_o$  – начальное давление, при котором создается движение плунжера,

$S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь мембраны.

**Электрические** ИМ имеют преимущества: высокое быстродействие, точность позиционирования, компактность, доступность источника энергии, большие перестановочные усилия. Недостатки: дороговизна, необходимость мер защиты во взрыво- и пожароопасных условиях.

Подразделяются на электродвигательные (привод от двигателя) и электромагнитные.

Промышленность выпускает практически только электродвигательные ИМ с напряжением 220 В или 380 В:

- многооборотные (МЭМ),
- однооборотные (МЭО) с углом поворота до  $360^\circ$ ,
- прямоходовые (МЭП).

Пример маркировки: МЭО-0,63/10-0,25 (однооборотный электрический ИМ, момент 6,3 Н·м, время хода 10 сек, номинальный ход 0,25 оборота).

### 3. Функциональные схемы автоматизации

#### 3.1. Условные обозначения

Все местные измерительные и преобразовательные приборы, установленные на технологическом объекте изображаются на функциональных схемах автоматизации в виде окружностей (см. рис. 2.30, а и б).

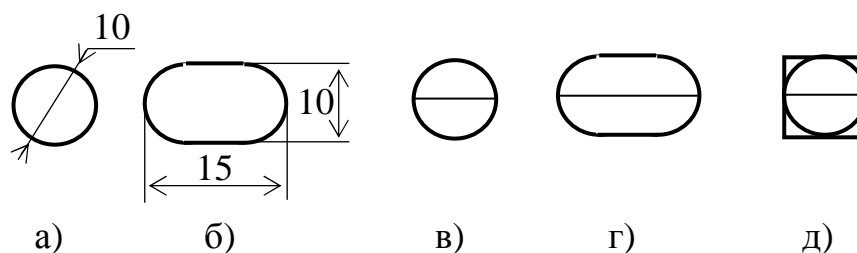


Рис. 2.30

Если приборы размещаются на щитах и пультах в центральных или местных операторных помещениях, то внутри окружности проводится горизонтальная разделительная линия (см. рис. 2.30, в и г). Если функция, которой соответствует окружность, реализована в системе распределенного управления (например, в компьютеризированной системе), то окружность вписывается в квадрат (см. рис. 2.30, д).

Внутри окружности вписываются:

- в верхнюю часть - функциональное обозначение (обозначения контролируемых, сигнализируемых или регулируемых параметров, обозначение функций и функциональных признаков приборов и устройств);
- в нижнюю - позиционные обозначения приборов и устройств.

Места расположения отборных устройств и точек измерения указываются с помощью тонких сплошных линий.

Буквенные обозначения средств автоматизации строятся на основе латинского алфавита и состоят из трех групп букв:

**1 буква** - Контролируемый, сигнализируемый или регулируемый параметр:

- D - плотность,
- E - любая электрическая величина,
- F - расход,
- G - положение, перемещение,
- H - ручное воздействие,
- K - временна'я программа,
- L - уровень,
- M - влажность,
- P - давление,
- Q - состав смеси, концентрация,
- R - радиоактивность,
- S - скорость (линейная или угловая),
- T - температура,
- U - разнородные величины,
- V - вязкость,
- W – масса.

**2 буква** (не обязательная) - уточнение характера измеряемой величины:

- D - разность, перепад,
- F - соотношение,
- J - автоматическое переключение,
- Q - суммирование, интегрирование.

**3 группа символов** (несколько букв) - функции и функциональные признаки прибора:

- I - показания,
- R - регистрация,
- C - регулирование,
- S - переключение,
- Y - преобразование сигналов, переключение,
- A - сигнализация,
- E - первичное преобразование параметра,
- T - промежуточное преобразование параметра, передача сигналов на расстояние,
- K - переключение управления с ручного на автоматическое и обратно, управление по программе, коррекция.

Условные обозначения других приборов, используемых на схемах, показаны на рис. 2.31:

- автоматическая защита из системы противоаварийной защиты (ПАЗ, см. рис. 2.31,а);
- технологическое отключение (включение) из системы управления (см. рис. 2.31, б);

- регулирующий клапан, открывающийся при прекращении подачи воздуха (нормально открытый) – рис. 2.31, в;
- регулирующий клапан, закрывающийся при прекращении подачи воздуха (нормально закрытый) – рис. 2.31, г;
- управляющий электропневматический клапан (ЭПК) – рис. 2.31, д;
- отсекающий с приводом (запорный клапан) – рис. 2.31, е.

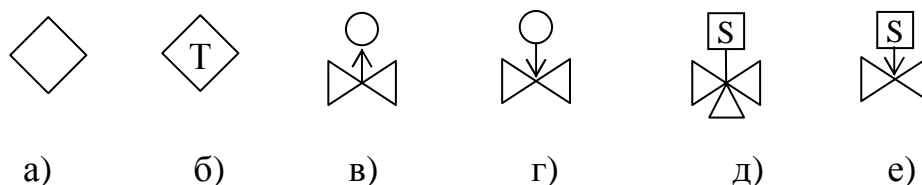









Рис. 2.31



### 3.2. Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации








(В скобках указаны примеры типов приборов)

-  Первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленный по месту (например, термоэлектрический преобразователь (термопара), термопреобразователь сопротивления, термобаллон манометрического термометра, датчик пирометра и т.д.).
-  Прибор для измерения температуры показывающий (термометры ртутный, манометрический и т.д.).
-  Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите (милливольтметр, логометр, потенциометр (типа КСП и др.), мост автоматический (типа КСМ и др) и т.д.).
-  Прибор для измерения температуры бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.
-  Прибор для измерения температуры одноточечный регистрирующий, установленный на щите (милливольтметр самопишущий, логометр, потенциометр и т.д.).
-  Прибор для измерения температуры с автоматическим обегющим устройством регистрирующий, установленный на щите (термометр манометрический, милливольтметр, потенциометр, мост и т.д.).
-  Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите (термометр манометрический, милливольтметр, потенциометр и т.д.).

- TC Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту (дилатометрический регулятор температуры и д.р.).
- TRK TC Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите (пневматический вторичный прибор, например, ПВ 10.1Э системы «Старт» с регулирующим блоком ПР 3.31).
- TS Прибор для измерения температуры бесшкальный с контактным устройством, установленный по месту (реле температурное).
- HC Байпасная панель дистанционного управления, установленная на щите.
- HC Переключатель электрических цепей измерения (управления), переключатель для газовых (воздушных) линий, установленный на щите.
- PI Прибор для измерения давления (разряжения), показывающий, установленный по месту (любой показывающий манометр, дифманометр, напорометр и т.д.).
- PDI Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту (дифманометр показывающий).
- PT Прибор для измерения давления (разряжения) бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (дифманометр бесшкальный с пневмо- или электропередачей).
- PR Прибор для измерения давления (разряжения) регистрирующий, установленный на щите (самопишущий манометр или любой другой вторичный прибор для регистрации давления).
- PS Прибор для измерения давления с контактным устройством, установленный по месту (реле давления).
- PIS Прибор для измерения давления (разряжения) показывающий с контактным устройством, установленный по месту (электроконтактный манометр и т.д.).
- PC Регулятор давления прямого действия «до себя».
- FE Первичный измерительный преобразователь для измерения расхода, установленный по месту (диафрагма, сопло Вентури датчик индукционного расходомера и т.д.).
- FT Прибор для измерения расхода бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (бесшкальный дифманометр, ротаметр с пневмо- или электропередачей).

- FFR Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите (любой вторичный прибор для регистрации соотношения расходов).
- FT Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту (дифманометр или ротаметр показывающий и т.д.).
- FQI Прибор для измерения расхода интегрирующий показывающий, установленный по месту (любой счетчик-расходомер с интегратором).
- FQI Прибор для измерения расхода показывающий интегрирующий, установленный на щите (показывающий дифманометр с интегратором).
- FQIS Прибор для измерения расхода интегрирующий с устройством для выдачи сигнала после прохождения заданного количество вещества, установленный по месту (счетчик-дозатор).
- LE Первичный измерительный преобразователь для измерения уровня, установленный по месту (датчик электрического или емкостного уровнемера).
- LI Прибор для измерения уровня показывающий, установленный по месту.
- LS Прибор для измерения уровня с контактным устройством, установленный по месту (реле уровня).
- LT Прибор для измерения уровня с контактным устройством бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (уровнемер бесшкальный с пневмо- или электропередачей).
- LCS<sup>H</sup> Прибор для измерения уровня бесшкальный регулирующий с контактным устройством, установленный по месту (электрический регулятор-сигнализатор уровня с блокировкой по верхнему уровню).
- LIA<sup>H</sup><sub>L</sub> Прибор для измерения уровня показывающий с контактным устройством, установленный на щите (вторичный показывающий прибор с сигнализацией верхнего и нижнего уровня).
- DT Прибор для измерения плотности раствора бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (датчик плотномера с пневмо- или электропередачей).
- GI Прибор для измерения размеров показывающий, установленный по месту (толщиномер).
- EI Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту.

-  Вольтметр.
-  Амперметр.
-  Ваттметр
-  Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите (командный пневматический прибор, многоцепное реле времени и т.д.).
-  Прибор для измерения влажности регистрирующий, установленный на щите (вторичный прибор влагомера и т.д.).
-  Первичный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту (датчик рН-метра и т.д.).
-  Прибор для измерения качества продукта показывающий, установленный по месту (газоанализатор на кислород и т.д.).
-  Прибор для измерения качества продукта регистрирующий регулирующий, установленный на щите (вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе и т.д.).
-  Прибор для измерения радиоактивности показывающий с контактным устройством, установленный по месту (прибор для показаний и сигнализации предельно допустимых значений  $\alpha$  и  $\beta$ -излучений).
-  Прибор для измерения частоты вращения привода регистрирующий, установленный на щите (вторичный прибор тахогенератора).
- $U=f(F,P,T)$   Прибор для измерения нескольких разнородных величин регистрирующий, установленный по месту (самопишущий дифманометр-расходомер с дополнительной записью давления и температуры).
-  Прибор для измерения вязкости раствора показывающий, установленный по месту (вискозиметр показывающий).
-  Прибор для измерения массы продукта показывающий с контактным устройством, установленный по месту (устройство электронно-тензометрическое сигнализирующее и т.д.).
-  Прибор для контроля погасания факела печи бесшкальный с контактным устройством, установленный на щите (вторичный прибор запально-защитного устройства; применение резервной буквы В должно быть оговорено на поле схемы).

-  Преобразователь сигнала, установленный на щите (входной и выходной сигналы – электрические; нормирующий преобразователь и т.д.).
-  Преобразователь сигнала, установленный по месту (входной сигнал пневматический, выходной – электрический; электропневмопреобразователь ЭПП-63 и т.д.).
-  Устройство, выполняющее функцию умножения на постоянный коэффициент К.
-  Пусковая аппаратура для управления электродвигателем (магнитный пускатель, контактор и т.д.; применение резервной буквы N должно быть оговорено на поле схемы).
-  Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления, установленная на щите (кнопка, ключ управления, задатчик и т.д.).
-  Аппаратура для ручного дистанционного управления, снабженная устройством для сигнализации, установленная на щите (кнопка с лампочкой и т.д.).
-  Ключ управления, предназначенный для выбора управления, установленный на щите.

### 3.3. Примеры схем контроля температуры.

#### 3.3.1 Индикация и регистрация температуры (TIR).

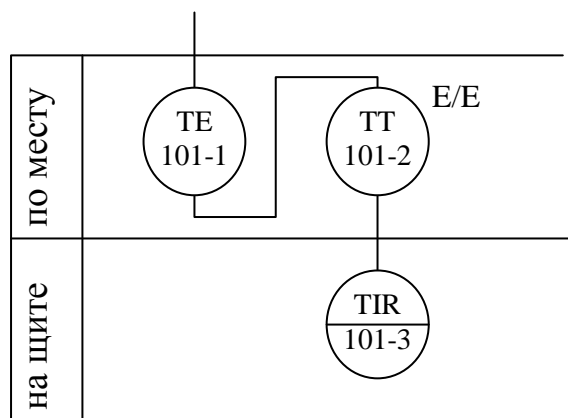


Рис. 2.32

101-1 Термоэлектрический термометр тип ТХА, гр. ХА, пределы измерения от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , материал корпуса Ст0Х20Н14С2, марка ТХА-0515

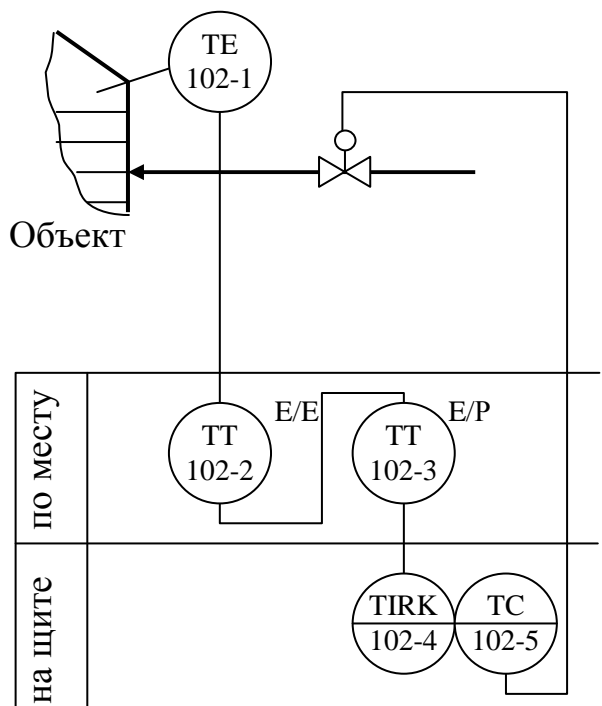
101-2 Преобразователь термоЭДС в стандартный токовый сигнал  $0...5\text{ мА}$ , гр. ХА, марка Ш-72

101-3 Миллиамперметр показывающий регистрирующий на 2 параметра, марка А-542

*Примечание:* Другие виды амперметров: А-502, А-503 – показывающие, А-542, А-543 – регистрирующие, последняя цифра – число параметров; А-100 – показывающий на 1 параметр.



### 3.3.2 Индикация, регистрация и регулирование температуры с помощью пневматического регулятора (TIRC, пневматика).



102-1 то же, что 101-1

102-2 то же, что 101-2

102-3 электропневмопреобразователь, входной сигнал 0...5 мА, выходной – стандартный пневматический 0,02...0,1 МПа, марка ЭПП-63 (или ЭПП-180)

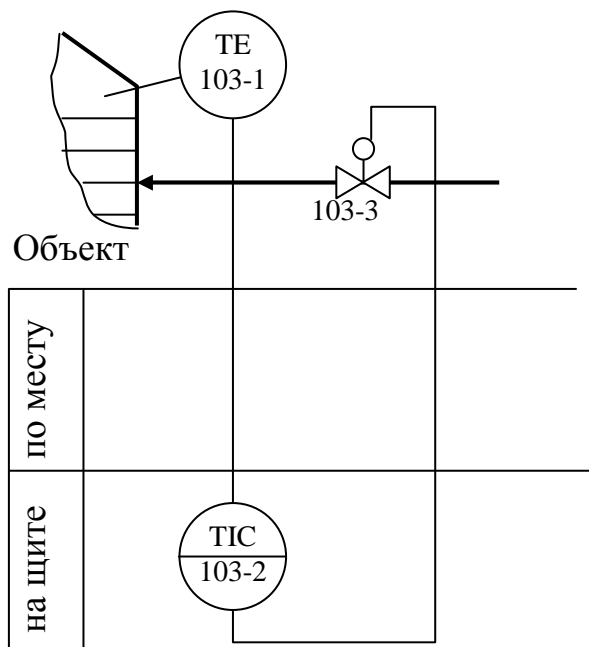
102-4 пневматический вторичный прибор на 3 параметра со станцией управления, марка ПВ 10.1Э (с электроприводом диаграммной ленты)

102-5 Пневматический ПИ-регулятор ПР 3.31

*Примечание:* Регуляторы ПР 2.31 сняты с производства.

Рис. 2.33

### 3.3.3 Индикация и регулирование температуры с помощью микропроцессорного регулятора (TIC, эл.).



103-1 то же, что 101-1

103-2 Трехканальный микропроцессорный регулятор типа «Протерм-100»

103-3 Регулирующий клапан для неагрессивных сред, корпус из чугуна, предельная температура  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление  $P_y = 1,6\text{ МПа}$ , условный диаметр  $D_y = 100\text{ мм}$ , тип 25нч32нж

Рис. 2.34

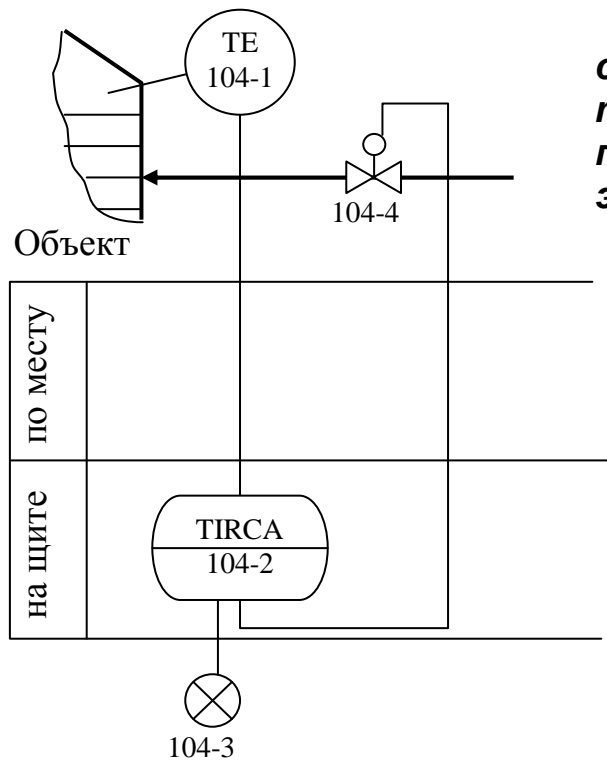


Рис. 2.35

### 3.3.4 Индикация, регистрация, сигнализация и регулирование температуры с помощью потенциометра (моста) (TIRC, эл.).

104-1 то же, что 101-1

104-2 Автоматический электронный потенциометр на 1 точку со встроенными устройствами регулирования и сигнализации, тип КСП-4 (или автоматический электронный мост типа КСМ-4 и т.д.)

104-3 Лампа сигнальная Л-1

104-4 то же, что 103-3

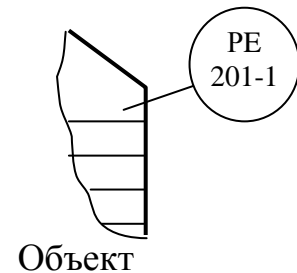


Рис. 2.36

## 3.4. Примеры схем контроля давления.

### 3.4.1 Индикация давления (PI).

210-1 Манометр пружинный М-... (см. рис. 2.36)

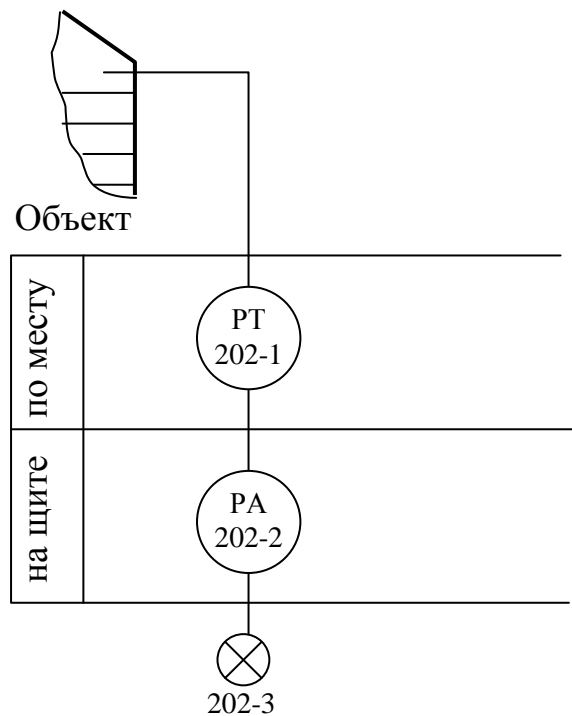


Рис. 2.37

### 3.4.2 Сигнализация давления (РА).

202-1 Пневматический первичный преобразователь давления, предел измерения 0... 1,6 МПа, выходной сигнал 0,02...0,1 МПа, марка МС-П-2 (манометр сильфонный с пневмовыходом)

202-2 Электроконтактный манометр с сигнальной лампой ЭКМ-1

202-3 то же, что 104-3

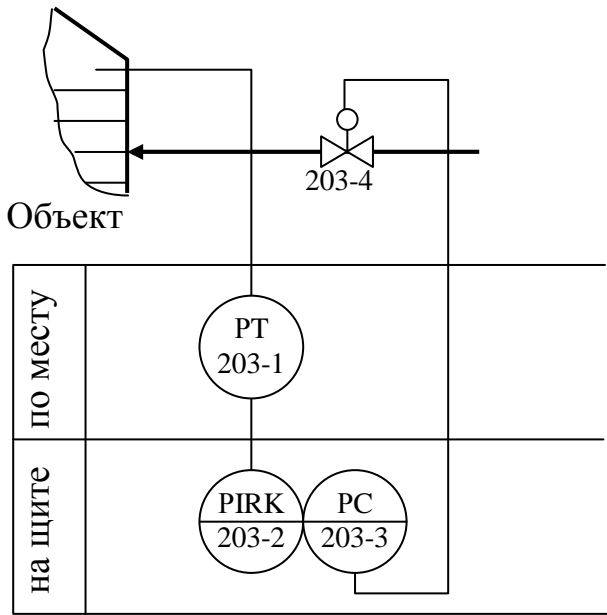


Рис. 2.38

### 3.4.3 Индикация, регистрация и регулирование давления (PIRC, пневматика)

См. рис. 2.38.

203-1 то же, что 202-1

203-2 то же, что 102-4

203-3 то же, что 102-5

203-4 то же, что 103-3

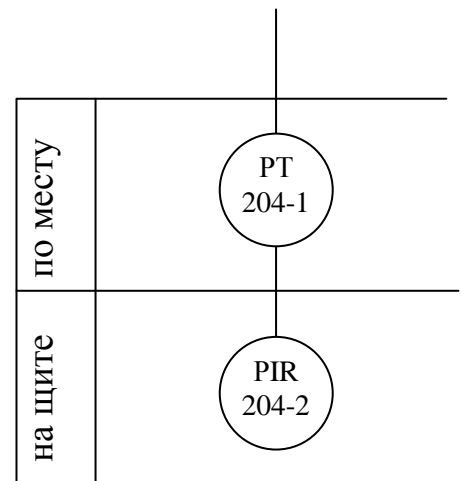


Рис. 2.39

### 3.4.4 Индикация и регистрация давления (PIR, эл.)

См. рис. 2.39.

204-1 Первичный преобразователь давления со стандартным токовым выходом 0...5 мА, марка МС-Э (или Сапфир-22ДИ и т.д.)

204-2 то же, что 101-3

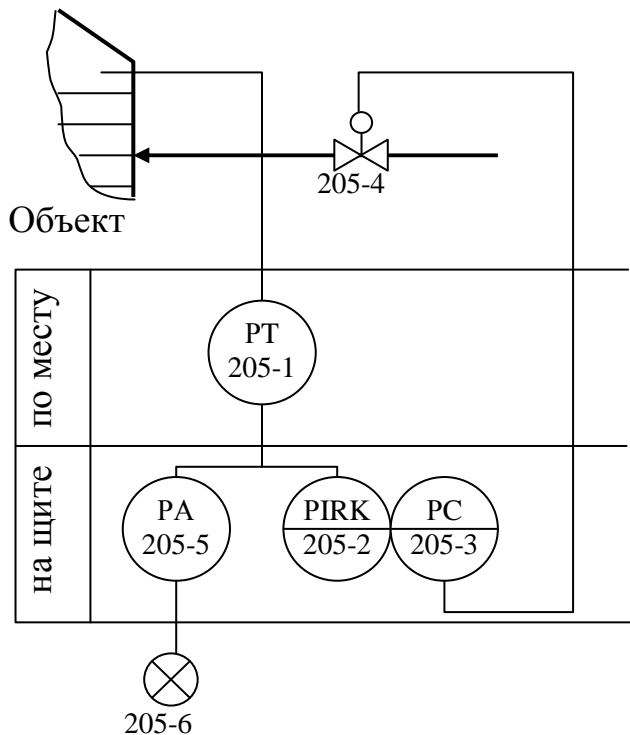


Рис. 2.40

### 3.4.5 Индикация, регистрация, регулирование и сигнализация давления (PIRCA, пневматика)

См. рис. 2.40.

205-1 то же, что 202-1

205-2 то же, что 102-4

205-3 то же, что 102-5

205-4 то же, что 103-3

205-5 то же, что 202-2

205-6 то же, что 202-3

### 3.5. Схемы контроля уровня и расхода.

Схемы контроля уровня аналогичны схемам контроля давления, поскольку его значение при измерении либо преобразуется в давление, либо датчики уровня, как и датчики давления, имеют на выходе стандартный пневматический или электрический сигнал.

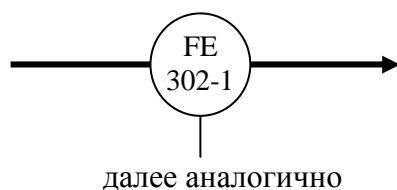
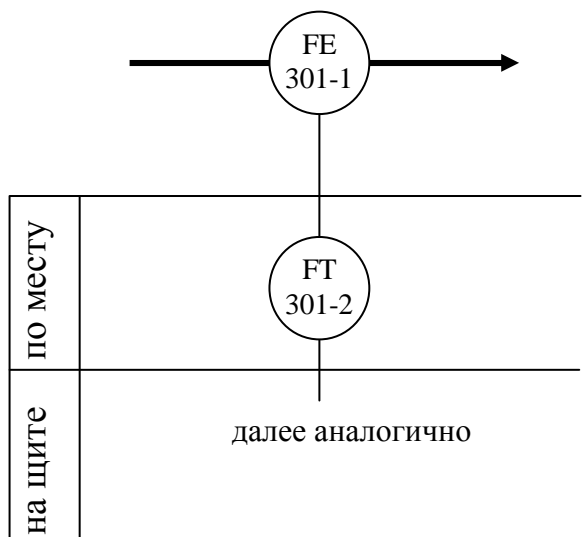


Рис. 2.41

Для измерения расхода жидкости первичные преобразователи устанавливаются в сечении трубопровода, поэтому на схеме обозначения также, как правило, изображаются встроенным в трубопровод.

При использовании сужающих устройств, например, диафрагм, перепад давлений на них замеряется дифманометрами, поэтому схемы автоматизации аналогичны схемам контроля давления. Прочие расходомеры, как правило, уже имеют на выходе стандартный сигнал.

Примеры схем:

301-1 Диафрагма марки ДК6-50-П-а/г-2 (диафрагма камерная, давление  $P_y = 6$  атм, диаметр  $D_y = 50$  мм)

301-2 Дифманометр с пневмовыходом 0,02...0,1 МПа, марка ДС-П1 (для пневматики) или Сапфир-22ДД (для электрической схемы)

302-1 Ротаметр РД-П (с пневмовыходом) или РД-Э (с электрическим выходом)

Таблица 2.2 - Форма спецификации к ФСА.

поз.	Параметры среды, измеряемые параметры	Наименование и техническая характеристика	Марка	К-во	Примечание
100-1 101-1 103-2	Давление в аппарате, $P_{max} = 0,5$ МПа	Манометр сильфонный с пневмовыходом, вых. сигнал 0,02...0,1 МПа, пределы измерений 0...1,6 МПа	МС-П2	3	по месту

Приборы в спецификации могут быть сгруппированы по позициям на схеме или по маркам.

## ЧАСТЬ 3. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ.

### 1. Структура АСУ ТП.

Характерной особенностью развития современной электронной промышленности является бурный рост, сопровождающийся столь же бурным снижением стоимости средств автоматизации, вычислительной техники, коммуникаций, устройств высокоточных измерений параметров.

Цифровые технологии быстро вытесняют аналоговые, преобладавшие в системах управления в недалеком прошлом. Это связано с тем, что возможности цифровых средств измерения и управления на порядок выше, чем у аналоговых. К числу их достоинств относятся:

- 1) более точное представление измеряемых величин;
- 2) большая помехозащищенность;
- 3) возможности построения вычислительных сетей;
- 4) большая гибкость и эффективность в управлении процессом и т.д.

Все эти возможности связаны с конкретными выгодами для пользователей:

- 1) ускорение работы операторов системы управления;
- 2) экономия финансовых ресурсов;
- 3) повышение качества и корректности решений, принимаемых операторами;
- 4) уменьшение потерь продукции и др.

Любую автоматическую систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) можно в конечном итоге разделить на 3 основных уровня иерархии:

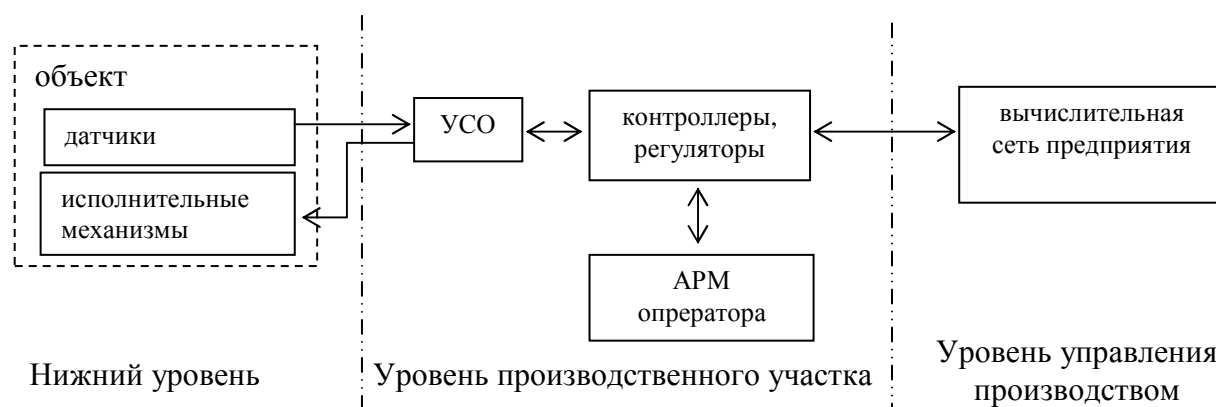


Рис. 3.1

Самым нижним уровнем является уровень датчиков и исполнительных механизмов, которые устанавливаются непосредственно на технологических объектах. Их деятельность заключается в получении параметров процесса, преобразовании их в соответствующий вид для дальнейшей передачи на более

высокую степень (функции датчиков), а также в приеме управляющих сигналов и в выполнении соответствующих действий (функции исполнительных механизмов).

Средний уровень - уровень производственного участка. Его функции:

- сбор информации, поступающей с нижнего уровня, ее обработка и хранение;
- выработка управляющих сигналов на основе анализа информации;
- передача информации о производственном участке на более высокий уровень.

Верхний уровень в системе автоматизации занимает т.н. уровень управления. На этом уровне осуществляется контроль за производством продукции. Этот процесс включает в себя сбор поступающих с производственных участков данных, их накопление, обработку и выдачу руководящих директив нижним ступеням. Атрибутом этого уровня является центр управления производством, который может состоять из трех взаимопроникающих частей:

- 1) операторской части,
- 2) системы подготовки отчетов,
- 3) системы анализа тенденций.

Операторская часть отвечает за связь между оператором и процессом на уровне управления. Она выдает информацию о процессе и позволяет в случае необходимости вмешательство ход автоматического управления. Обеспечивает диалог между системой и операторами.

Система подготовки отчетов выводит на экраны, принтеры, в архивы и т.д. информацию о технологических параметрах с указанием точного времени измерения, выдает данные о материальном и энергетическом балансе и др.

Система анализа тенденций дает оператору возможность наблюдения за технологическими параметрами и делать соответствующие выводы.

На верхнем уровне АСУ ТП размещены мощные компьютеры, выполняющие функции серверов баз данных и рабочих станций и обеспечивающие анализ и хранение всей поступившей информации за любой заданный интервал времени. а также визуализацию информации и взаимодействие с оператором. Основой программного обеспечения верхнего уровня являются пакеты SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - системы управления и доступа к данным).

## **2. Устройства связи с объектом (УСО).**

Почти все технологические параметры, присутствующие в реальном технологическом объекте. имеют аналоговый или дискретный вид. Существует много датчиков, которые могут преобразовывать измеряемые величины только в аналоговый вид (напряжение, сопротивление, давление), а

также много исполнительных механизмов, имеющих только аналоговые входные сигналы. Для того, чтобы связать между собой параметры, представленные в аналоговом и цифровом видах, в современной АСУТП используют устройства связи объектом.

Модули УСО - это конструктивно законченные устройства, выполненные в виде модулей, устанавливаемых, как правило, в специализированные платы с клеммными соединителями или стандартный DIN-рельс.

На УСО возлагаются следующие функции:

- 1) Нормализация аналогового сигнала, т.е. приведение границ шкалы первичного непрерывного сигнала к одному из стандартных диапазонов входных сигналов АЦП.
- 2) Предварительная низкочастотная фильтрация аналогового сигнала - ограничение полосы частот первичного непрерывного сигнала с целью снижения влияния на результат измерения помех различного происхождения.
- 3) Обеспечение гальванической изоляции между источниками сигнала и каналами системы.

Помимо этих функций ряд УСО может выполнять более сложные функции за счет наличия в их составе АЦП, дискретного ввода-вывода, микропроцессора и интерфейсов передачи данных.

По характеру обрабатываемого сигнала УСО можно разделить на *аналоговые, дискретные и цифровые*.

Аналоговые УСО (аналого-цифровые преобразователи АЦП, цифро-аналоговые преобразователи ЦАП и др.) должны обладать большой точностью, линейностью и большим напряжением изоляции.

Дискретные УСО обеспечивают опрос датчиков с релейным выходом, выключателей, контроля наличия напряжения в сети и т.д., а выходные дискретные УСО формируют сигналы для управления пускателями, двигателями и прочими устройствами. Дискретные УСО удовлетворяют тем же требованиям, что и аналоговые, но, кроме того, обладают минимальным временем переключения, а выходные могут обеспечивать коммутацию более высоких токов и напряжений.

Среди модулей УСО существуют также устройства, работающие только с цифровой информацией. К ним относятся коммуникационные модули, предназначенные для сетевого взаимодействия (например, повторители для увеличения протяженности линии связи, преобразователи интерфейсов RS-232/RS-485).

По направлению прохождения данных модули УСО можно разделить на три типа:

- 1) устройства ввода, обеспечивающие передачу сигналов датчиков;
- 2) устройства вывода для формирования сигналов на исполнительные механизмы;
- 3) двунаправленные.

В реальных системах модули УСО могут не присутствовать в виде самостоятельных устройств, а входить в состав датчиков (в этом случае датчики называют интеллектуальными) или промышленных компьютеров. Примером могут служить датчики, выдающие готовый цифровой сигнал. в этом случае граница между первичным преобразователем и УСО проходит где-то внутри датчика. С другой стороны, УСО могут быть выполнены в виде АЦП/ЦАП-плат, вставляемых в стандартные ISA или PCI слоты компьютера. В этом случае аналоговые сигналы могут быть введены прямо в компьютер, где и преобразуются в цифровой вид.

### **3. Аппаратная и программная платформа контроллеров.**

Промышленные контроллеры и компьютеры, расположенные на среднем уровне АСУТП играют роль управляющих элементов, принимающих цифровую информацию и передающих управляющие сигналы.

До последнего времени роль контроллеров в АСУТП в основном исполняли PLC (Programmable Logic Controller - программируемые логические контроллеры) зарубежного и отечественного производства. Наиболее популярны нашей стране PLC таких зарубежных производителей, как Allen-Braidly, Siemens, ABB, Modicon, а также отечественные модели: «Ломиконт», «Ремиконт», Ш-711, «Микродат», «Эмикон» и др.

В связи с бурным ростом производства миниатюрных PC-совместимых компьютеров последние все чаще стали использовать в качестве контроллеров.

Первое и главное преимущество PC-контроллеров связано с их открытостью, позволяющей применять в АСУ оборудование разных фирм. Теперь пользователь не привязан к конкретному производителю.

Второе важное преимущество их заключается в более «родственных» связях с компьютерами верхнего уровня. В результате не требуются дополнительные затраты на подготовку персонала.

Третье преимущество - более высокая надежность. Обычно различают физическую и программную надежность контроллеров. Под физической надежностью понимают способность аппаратуры устойчиво функционировать в условиях окружающей среды промышленного цеха и противостоять ее вредному воздействию. Под программной понимается способность программного обеспечения (ПО) устойчиво функционировать в ситуациях, требующих реакции в заданное время. Программная надежность определяется



в первую очередь степенью отлаженности ПО. Поскольку в большинстве PC-контроллеров используются коммерческие широко распространенные и хорошо отлаженные операционные системы (Windows, Unix, Linux, QNX и др.), то следует ожидать, что программная надежность будет выше, чем у PLC.

Операционные системы контроллеров должны удовлетворять не только требованиям открытости, но и требованиям работы в режиме реального времени, была компактна и имела возможность запуска из ПЗУ или флэш-памяти.

#### **4. Операционная система PC-контроллеров**

Операционная система контроллеров должна удовлетворять требованиям открытости. Но не только им. Специфика условий работы контроллеров требует, чтобы ОС поддерживала работу в режиме реального времени, была компактна и имела возможность запуска из ПЗУ или флэш-памяти.

Для PC-контроллеров лучше всего подходит операционная система QNX (фирма QSSL, Канада). Прежде всего, это связано с тем, что архитектура QNX является открытой, модульной и легко модифицируемой. QNX может загружаться как из ПЗУ, флэш-памяти, так и с помощью удаленной загрузки по сети. QNX разработана в соответствии со стандартами POSIX, является коммерческой операционной системой, широко распространена на мировом рынке (сотни тысяч продаж), поддерживает все шины, используемые в PC-контроллерах, включая ISA, PCI, CompactPCI, PC/104, VME, STD32. Более ста фирм - производителей программного и аппаратного обеспечения выпускают продукцию, ориентированную на QNX.

QNX является операционной системой, которая дает полную гарантию в том, что процесс с наивысшим приоритетом начнет выполняться практически немедленно и что критическое событие (например, сигнал тревоги) всегда будет обработано. Она известна как операционная система, функционирующая в "защищенном режиме". Это означает, что все программы в системе защищены друг от друга и любая "фатальная" ошибка в одной из программ не приводит к "краху" всей системы. Файловая система QNX была разработана с учетом обеспечения целостности данных при отключениях питания. Даже при форс-мажорном отключении питания вы лишь потеряете некоторые данные из кэш-памяти, но файловая система не разрушится. После включения компьютера будет обеспечена нормальная работа системы. В QNX полностью реализовано встроенное сетевое взаимодействие "точка-точка". По существу, сеть из машин QNX действует как один мощный компьютер. Любые ресурсы (модемы, диски, принтеры) могут быть добавлены к системе

простым подключением к любой машине в сети. QNX поддерживает одновременную работу в сетях Ethernet, Arcnet, Serial и Token Ring и обеспечивает более чем один путь для коммуникации, а также балансировку нагрузки в сетях. Если кабель или сетевая плата выходят из строя и связь прекращается, то система будет автоматически перенаправлять данные через другую сеть. Это предоставляет пользователю автоматическую сетевую избыточность и увеличивает скорость и надежность коммуникаций во всей системе.

## **5. Средства технологического программирования контроллеров**

Специфика работы с контроллерами по сравнению с обычными офисными компьютерами состоит не только в ориентации на работу с платами ввода-вывода, но и в преимущественном использовании языков технологического программирования. Как правило, на промышленных предприятиях с контроллерами работают не программисты, а технологи, хорошо знающие специфику объектов управления и технологического процесса. Для описания процессов обычно используются такие языки, как язык релейно-контактных схем, функциональных блоков и так далее, теоретические основы которых взяты из методов автоматического управления. Накопленный многими фирмами опыт был обобщен в виде стандарта IEC 1131-3 [1], где определены пять языков программирования контроллеров: SFC - последовательных функциональных схем, LD - релейных диаграмм, FBD - функциональных блок-диаграмм, ST - структурированного текста, IL - инструкций. Важно отметить, что использование данного стандарта полностью соответствует концепции открытых систем, а именно, делает программу для контроллера независимой от конкретного оборудования - ни от типа процессора, ни от операционной системы, ни от плат ввода-вывода. В настоящее время программы многих фирм поддерживают этот стандарт: ACCON-Prosyst 1131 (фирма DeltaLogic), Open DK (фирма infoteam Software GmbH), Multiprog (фирма KW Software), NAI Control (Matsushita Automation Controls) и др. Наиболее известной реализацией этого стандарта является пакет ISaGRAF фирмы CJ International, включающий систему разработки (WorkBench) и систему исполнения (Target).

Если первая используется для создания, моделирования, тестирования и документирования прикладных программ, исполняемых под управлением ядра ISaGRAF, то вторая загружается извне либо записывается в ПЗУ. По данным организации PLCopen, в настоящее время программа, созданная с помощью ISaGRAF, может быть загружена и исполнена на процессорах Intel и Motorola под управлением операционных систем DOS, OS-9, QNX, iRMX,

Lynx, pSOS, OS-9000, VMEexec, VRTX, VxWorks, Windows NT. Основными достоинствами ISaGRAF являются простой, интуитивно понятный для технолога графический интерфейс, встроенные средства отладки, моделирования, тестирования и документирования программ, поддержка промышленных сетей (Profibus, Modbus).

### **6. Пример реализации контроллеров**

В качестве примера контроллера, построенного на базе концепции открытых систем рассмотрим контроллер CS104 фирмы Steinhoff. Это компактный, модульный и PC-совместимый компьютер, который может комплектоваться оборудованием любой фирмы, поставляющей платы в формате PC/104, в том числе платы ввода-вывода, жесткие или гибкие диски, PC-карты, флэш-память и т. д. Базовый комплект контроллера фирмы Steinhoff: процессорный модуль, включающий сам процессор, 4-Мбайт динамическое ОЗУ, интерфейсы для клавиатуры, мыши, два последовательных и один параллельный порт, IDE/FDD, 128-Кбайт флэш-памяти, таймер реального времени, сторожевой таймер, Ethernet. Для ОС QNX обеспечивается удаленная загрузка по сети. По усмотрению пользователя контроллер CS104 может быть укомплектован одним из следующих интерфейсов для промышленных сетей: Profibus, CAN, InterBus-S, LonWorks, П/О Lightbus, к каждому из которых поставляются драйверы, работающие в QNX. Для технологического программирования используется пакет ISaGRAF с исполнительной системой для ОС QNX. Такая архитектура ПО позволяет на работающей системе осуществлять удаленное программирование (на технологических языках IL, ST, FB, SFC, LD) и отладку в защищенном режиме элементов приложения, обслуживающих отдельные 32-разрядные задачи рабочего процесса, что гарантирует высокую надежность работы системы в целом.

Взаимодействие со SCADA-системами обеспечивают драйверы для нескольких пакетов, таких как RealFlex, Sitex и др. [2]. Таким образом, контроллер CS104 позволяет построить систему АСУ ТП с использованием стандартных компонентов, обладающую модульностью и масштабируемостью, т. е. в полной мере соответствующую концепции открытых систем.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кулаков М.В. Технические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. - 424 с.
2. Никитенко Е.А. автоматизация и телеконтроль электрохимической защитой магистральных газопроводов. М.: Недра, 1976.
3. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Учеб. пособ. -М.: Химия, 1982. - 296 с.
4. Теория автоматического управления / Под ред. Нетушила А.В. Ч.1. -М.: Высш. шк., 1968.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. -М.: Наука, 1966.
6. Дадаян Л.Г. Автоматизация технологических процессов: методические указания к курсовому и дипломному проектированию. -Уфа.: Изд-во УНИ, 1985. - 225 с.
7. Камразе А.Н., Фитерман М.Я. Контрольно-измерительные приборы и автоматика. Л.: Химия, 1988. - 225 с.
8. Стефани Е.П. Основы построения АСУТП: Учеб. пособ. -М.: Энергоиздат, 1982. -352 с.
9. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины: Справочник /Под ред. Кошарского Б.Д. -Изд. 3-е. -Л.: Машиностроение, 1976. -486 с.
10. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности: Учебник. -М.: Химия, 1985. - 352 с.
11. Теория автоматического управления: Учебник. В 2-х частях / Под ред. А.А.Воронова. -М.: Высш.шк., 1986. -Ч.1. - 367 с. - Ч.2. -504 с.
12. Аязян Г.К. Расчет автоматических систем с типовыми алгоритмами регулирования: Учеб. пособ. -Уфа.: Изд-во УНИ, 1986. -135 с.
13. Веревкин А.П., Попков В.Ф. Технические средства автоматизации. Исполнительные устройства: Учеб. пособ. -Уфа.: Изд-во УНИ, 1996. -95 с.
14. ГОСТ 21.404-85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации.
15. ГОСТ 21.408-93. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов.
16. Кузнецов А. SCADA-системы: программистом можешь ты не быть.// СТА. -1996. -№ 1. -С. 32 – 35.
17. Кабаев С. SCADA-пакет InTouch в отечественных проектах.// Мир компьютерной автоматизации. -1997. -№ 2. – С. 88 – 90.
18. Христенсен Д. Знакомство со стандартом на языки программирования PLC IEC 1131-3.// Мир компьютерной автоматизации. -1997. -№ 2. – С. 24 – 25.

**СОДЕРЖАНИЕ****С.**

<b>Часть 1. Теория Автоматического Управления (ТАУ)</b>	<b>3</b>
1. Основные термины и определения ТАУ.	3
1.1. Основные понятия.	3
1.2. Классификация АСР.	6
1.3. Классификация элементов автоматических систем.	8
2. Характеристики и модели элементов и систем.	8
2.1. Основные модели.	8
2.2. Статические характеристики.	9
2.3. Динамические характеристики.	10
2.4. Дифференциальные уравнения. Линеаризация.	11
2.5. Преобразования Лапласа.	13
2.6. Передаточные функции.	16
2.6.1 Определение передаточной функции.	16
2.6.2 Примеры типовых звеньев.	17
2.6.3 Соединения звеньев.	19
2.6.4 Передаточные функции АСР.	20
2.6.5 Определение параметров передаточной функции объекта по переходной кривой.	21
2.7. Частотные характеристики.	22
2.7.1 Определение частотных характеристик.	22
2.7.2 Логарифмические частотные характеристики.	24
3. Качество процессов управления.	25
3.1. Критерии устойчивости.	25
3.1.1 Устойчивость.	25
3.1.2 Корневой критерий.	26
3.1.3 Критерий Стодолы.	27
3.1.4 Критерий Гурвица.	27
3.1.5 Критерий Михайлова.	29
3.1.6 Критерий Найквиста.	29
3.2. Показатели качества	30
3.2.1 Прямые показатели качества.	30
3.2.2 Корневые показатели качества.	31
3.2.3 Частотные показатели качества.	31
3.2.4 Связи между показателями качества.	32
4. Настройка регуляторов.	32
4.1. Типы регуляторов.	32
4.2. Определение оптимальных настроек регуляторов.	33
<b>Часть 2. Средства автоматизации и управления.</b>	<b>35</b>
1. Измерения технологических параметров.	35
1.1. Государственная система приборов (ГСП).	35
1.2. Точность преобразования информации.	35

1.3. Классификация КИП.	37
1.4. Виды первичных преобразователей.	37
1.5. Методы и приборы для измерения температуры.	38
1.5.1 Классификация термометров.	38
1.5.2 Термометры расширения. Жидкостные стеклянные.	38
1.5.3 Термометры, основанные на расширении твердых тел.	39
1.5.4 Газовые манометрические термометры.	39
1.5.5 Жидкостные манометрические термометры.	40
1.5.6 Конденсационные манометрические термометры.	40
1.5.7 Электрические термометры.	40
1.5.8 Термометры сопротивления.	42
1.5.9 Пирометры излучения.	42
1.5.10 Цветовые пирометры.	43
1.6. Вторичные приборы для измерения разности потенциалов.	43
1.6.1 Пирометрические милливольтметры.	43
1.6.2 Потенциометры.	44
1.6.3 Автоматические электрические потенциометры.	44
1.7. Методы измерения сопротивления.	45
1.8. Методы и приборы для измерения давления и разряжения.	46
1.8.1 Классификация приборов для измерения давления.	46
1.8.2 Жидкостные манометры.	47
1.8.3 Чашечные манометры и дифманометры.	47
1.8.4 Микроманометры.	48
1.8.5 Пружинные манометры.	48
1.8.6 Электрические манометры.	48
Преобразователи давления типа "Сапфир".	48
1.9. Методы и приборы для измерения расхода пара, газа и жидкости.	50
1.9.1 Классификация.	50
1.9.2 Метод переменного перепада давления.	51
1.9.3 Расходомеры постоянного перепада давления.	52
1.9.4 Расходомеры переменного уровня.	52
1.9.5 Расходомеры скоростного напора.	53
1.10. Методы и приборы для измерения уровня.	53
1.10.1 Методы измерения уровня.	53
1.10.2 Поплавковый метод измерения уровня.	53
1.10.3 Буйковые уровнемеры.	53
1.10.4 Гидростатические уровнемеры.	54
1.10.5 Электрические методы измерения уровня.	54
2. Исполнительные устройства	55
2.1. Классификация исполнительных устройств	55
2.2. Исполнительные устройства насосного типа	55
2.3. Исполнительные устройства реологического типа	56
2.4. Исполнительные устройства дроссельного типа	56
2.5. Исполнительные механизмы	57

3. Функциональные схемы автоматизации	58
3.1. Условные обозначения	58
3.2. Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации	60
3.3. Примеры схем контроля температуры	64
3.4. Примеры схем контроля давления	66
3.5. Схемы контроля уровня и расхода	68
<b>Часть 3. Современные системы управления производством</b>	<b>69</b>
1. Структура АСУ ТП	69
2. Устройства связи с объектом (УСО).	70
3. Аппаратная и программная платформа контроллеров	72
4. Операционная система PC-контроллеров	73
5. Средства технологического программирования контроллеров	74
6. Пример реализации контроллеров	75
Литература	76