

## **ЛЕКЦИИ**

по дисциплине

Теория, расчет и проектирование измерительных  
преобразователей и приборов

Составитель: д.т.н., проф. Степанов М.С.

## МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ

Для оценки результатов измерений и выработки требований к измерительной технике осуществляют моделирование процесса измерения, одним из этапов которого является выделение главных явлений и факторов рассматриваемого процесса.

Различают две основные модели.

**1. Классическая модель** - рассматривает измерение как эксперимент, условия которого строго определены и соблюдаются. Модель имеет следующие ограничения:

- на протяжении всего измерения измеряемая физическая величина сохраняет неизменным своё истинное значение, которое можно охарактеризовать действительным значением, лежащим внутри доверительного интервала;
- измерение осуществляется путем сравнения измеряемой величины с мерой, при этом продолжительность измерения не ограничена и сравнение с мерой может выполняться как угодно долго и тщательно;
- внешние условия и факторы, влияющие на результат измерения, точно определены.

Таким образом, по существу классическая модель представляет собой идеализированный метрологический эксперимент сравнения измеряемой величины с мерой.

В измерительной практике такие измерения применяют редко.

Все измерения, связанные с контролем современных технологических процессов при автоматическом управлении, многие виды измерений при проведении научных исследований, измерения при комплексных испытаниях сложной техники, машин, агрегатов и сооружений, представляют собой измерения изменяющихся во времени физических величин. При этом непрерывное сравнение бесконечного множества мгновенных значений

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
измеряемой величины с единицей измерения (мерой) невозможно, поскольку сам процесс измерения происходит во времени.

Для описания таких измерений применяют вторую модель процесса измерения.

**2. Информационная модель** – имеет следующие отличительные признаки:

- измеряемая физическая величина рассматривается как случайный процесс, содержащий необходимую информацию о состоянии исследуемого или контролируемого объекта, и описывается случайной последовательностью действительных значений или обобщенными характеристиками такой последовательности (математическое ожидание, дисперсия). Истинное (мгновенное) значение измеряемой величины на данном интервале процесса измерения может оставаться неопределенным;

- измерение в общем случае рассматривается как последовательность определенных измерительных процедур, время выполнения которых ограничено, при этом непосредственное сравнение с мерой в общем случае неосуществимо;

- характеристики измерительных устройств могут изменяться во времени и под влиянием переменных внешних факторов. Эти изменения рассматриваются как случайные процессы, влияющие на конечную неопределённость результата измерения.

Сравнение двух моделей процесса измерения показывает, что классическая модель является частным случаем информационной.

Таким образом, в соответствии с современной информационной моделью **процесс измерения любой физической величины рассматривается как совокупность ряда последовательных измерительных преобразований.**

## ПОНЯТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Измерительное преобразование представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Опираясь на это понятие, **измерение рассматривается как процесс приема и преобразования информации о значениях измеряемых физических величин, происходящий в измерительных устройствах.**

Такая информация называется **измерительной информацией.**

В этой связи структура измерительных устройств представляет собой совокупность отдельных элементов – измерительных преобразователей, осуществляющих функциональные измерительные преобразования **сигналов измерительной информации** – сигналов, функционально связанных с измеряемой физической величиной.



**Измерительный преобразователь** – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительный преобразователь (ИП) представляет собой техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе действия и выполняющее одно частное измерительное преобразование.

Понятие “измерительный преобразователь” значительно более узкое, более конкретное, чем понятие “измерительное преобразование”, т.к. одно и

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
тоже измерительное преобразование может выполняться целым рядом различных по принципу действия измерительных преобразователей.

Указание измерительного преобразования отвечает на вопрос: что и во что нужно преобразовать, т.е. только ставит задачу преобразования, а указание конкретных измерительных преобразователей отвечает на вопрос о том, как это физически предлагается выполнить.

Датчик – это один или несколько ИП, служащих для преобразования измеряемой не электрической величины в электрическую и объединенных в единую конструкцию.

*Измерительная цепь средства измерений* представляет из себя совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Цепь последовательного преобразования измеряемой величины характеризуется тем, что измеряемая величина поступает на вход первого ИП, его выходная величина является входной величиной второго ИП и т.д.

*Первичный измерительный преобразователь* - измерительный преобразователь к которому подведена измеряемая величина, т.е. первый в измерительной цепи.

*Промежуточный измерительный преобразователь* - измерительный преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного.

Преобразование осуществляется до тех пор, пока на выходе последнего И.П., который называется выходным И.П., не будет получена выходная величина, удобная для использования с целью регистрации или управления.

Основным требованием к выбранной выходной величине является удобство передачи и хранения. Этому требованию удовлетворяют главным образом электрические величины: ЭДС, ток и связанное с ними сопротивление, индуктивность и взаимоиндуктивность.

По виду выходной величины ИП подразделяют на генераторные и параметрические.

**Генераторные ИП** создают энергию на выходе, причем эта энергия создается за счет энергии, потребляемой от объекта измерения. Например: термопары, пьезоэлементы, выходная величина которых – электрическое напряжение.

В **параметрических ИП** под влиянием измеряемой величины изменяется один из параметров. Например: резистивные, тензорезисторные, емкостные, индуктивные ИП. Такие ИП включают в специальные электрические схемы, которые питаются от источника питания.

Различают два режима работы ИП: статический и динамический.

В **статическом** режиме значения измеряемой величины и параметров ИП постоянны, а продолжительность измерения неограниченна. Выходная величина также принимает постоянное значение.

На практике: измеряемая величина часто меняется во времени, измерения обычно нужно проводить за возможно более короткое время, параметры самого ИП только приближенно можно считать неизменными.

**Динамический режим** характеризуется тем, что входная величина  $x(t)$ , и выходная величина  $y(t)$  изменяются во времени.

### **Статические характеристики измерительных преобразователей**

1. **Функция преобразования** – функциональная зависимость между выходной величиной  $y$  и входной величиной  $x$ .

Как и любая функция, функция преобразования может задаваться аналитически (управления), таблицей или графиком. В аналитическую функцию преобразования обычно входят конструктивные параметры ИП и поэтому она используется при расчете и проектировании. Функция преобразования реального ИП определяется экспериментально.

Чаще всего стремятся иметь линейную характеристику ИП. Для описания линейной характеристики  $y=f(x)= A+Bx$  достаточно двух

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
параметров: начального значения выходной величины А, соответствующего нулевому (или какому-либо другому характерному) значению входной величины х, и показателем относительного наклона характеристики.

2. **Чувствительность** – это отношение измерения входной величины ИП к вызвавшему его изменению входной величины И. Чувствительность определяется выражением  $S = \frac{dy}{dx}$  и может быть определена при любом способе задания функции преобразования.

При пропорциональной зависимости выходной и входной величин

$$S = \frac{y}{x},$$

где у – значение выходной величины, соответствующее входной величине х.

При нелинейной функции преобразования чувствительность зависит от значения входной величины. Относительная чувствительность

$$S = \frac{dy / y}{dx / x}.$$

### **Динамические характеристики измерительных преобразователей**

Динамическими характеристиками линейных первичных измерительных преобразователей называются характеристики их инерционных свойств, определяющие зависимость выходного сигнала ИП от изменяющихся во времени величин:

- параметров входного сигнала (измеряемой величины  $x(t)$ );
- внешних влияющих величин;
- нагрузки.

ГОСТ 8.256-77 « ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик линейных аналоговых средств измерений. Основные положения» устанавливает классификацию динамических характеристик. Динамические характеристики разделяют по отношению к тем или иным

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
параметрам входного сигнала на основные и дополнительные, а по признаку полноты описания динамических свойств - на полные и частные.

**Основные** характеристики отражают связь выходного сигнала ИП с изменяющейся входной величиной; **дополнительные** — изменения выходного сигнала в зависимости от изменения внешней влияющей величины или неинформативного параметра входного сигнала (температуры окружающей среды, напряжения питания, сопротивления нагрузке, частоты переменного тока при изменении его амплитуды).

**Полной** динамической характеристикой ИП называется динамическая характеристика однозначно определяющая изменения его выходного сигнала при любом изменении во времени входного сигнала или влияющей величины.

**Частной** динамической характеристикой ИП называется динамическая характеристика представляющая собой параметр или функционал полной динамической характеристики.

Согласно ГОСТ 8.256-77 к полным динамическим характеристикам относятся: дифференциальное уравнение; импульсная характеристика; переходная характеристика; передаточная функция; совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик (АЧХ и АФХ).

### 1) Передаточная функция

Динамический режим работы СИ наиболее полно описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$A_n y^{(n)}(t) + A_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + A_1 y'(t) + y(t) = k_H x(t) \quad (2)$$

где  $y^{(n)}(t) = \frac{d^n y(t)}{dt^n}$

Это уравнение отличается от (1) наличием членов, содержащих производные от  $y(t)$ , которые и определяют динамические свойства СИ.



Для упрощения математического описания динамических процессов используются преобразования Фурье и Лапласа.

Используя преобразование Лапласа, можно записать уравнение (2) в операторной форме:

$$(A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + 1) Y(p) = k_H X(p),$$

где  $X(p)$ ,  $Y(p)$  – изображения по Лапласу  $x(t)$ ,  $y(t)$ .

Передаточной функцией называется отношение изображения по Лапласу выходного и входного сигналов:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_H}{A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + 1}.$$

## 2) Переходная характеристика.

Переходная характеристика  $h(t)$  представляет собой зависимость выходной величины линейного динамического преобразователя от времени при подаче на его вход в момент  $t=0$  ступенчатого сигнала единичной амплитуды (единичной функции):  $x(t)=1(t)=\begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$ .

## 3) Импульсная характеристика.

Импульсная характеристика  $g(t)$  представляет собой зависимость выходной величины линейного динамического преобразователя от времени при подаче на его вход в момент  $t=0$  единичного импульсного сигнала – импульсной функции, или  $\delta$  – функции Дирака:  $\delta(t)=\begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ 1 & t = 0 \end{cases}$ .

## 4. Амплитудно-фазовая характеристика.

Если на вход линейного ИП поступает синусоидальный сигнал, то и на выходе будет синусоидальный сигнал, но с другими значениями амплитуды и фазы. Частотные методы анализа основаны на исследовании прохождения гармонических колебаний различных частот через СИ.

Если на вход подать сигнал

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_x),$$

то на выходе

$$y(t)=y_m \sin (\omega t+\varphi_y).$$

Для математического описания используют преобразования Фурье,

Поэтому входной и выходной сигналы можно представить следующим образом:

$$x(j\omega)=x_m(\omega)e^{j(\omega t+\varphi_x)}$$

$$e(j\omega)=y_m(\omega)e^{(\omega t+\varphi_y)}$$

Отношение  $W(j\omega)=\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)}=\frac{y_m(\omega)}{x_m(\omega)}e^{j\varphi(\omega)}=A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$  называется

амплитудно-фазовой характеристикой (или частотной передаточной функцией). Иначе говоря, это отношение изображений Фурье выходной и входной величин. Амплитудно-фазовая характеристика является формой записи передаточной функции для синусоидального входного воздействия.

Модуль  $A(\omega)$  амплитудно-фазовой характеристики называется амплитудно-частотной характеристикой – она выражает зависимость отношения амплитуд выходной и входной синусоидальных величин от частоты  $\omega$ .

Аргумент  $\varphi(\omega)$  амплитудно-фазовой характеристики называется фазо-частотной характеристикой – она выражает зависимость фазового сдвига выходной синусоидальной величины по отношению к входной от частоты.

### **Применение динамических характеристик для анализа измерительных систем**

Для исследования динамических свойств наиболее широко используют следующие типовые звенья: безынерционное звено, а также звенья первого и второго порядков.

**Безынерционное звено** – это идеализация реальных звеньев, при котором пренебрегают влиянием динамических процессов в этих звеньях.

Такое звено и в статическом, и в динамическом режимах описывается уравнением  $y(t)=k_H x(t)$ .

**Динамическое звено первого порядка** описывается уравнением:

$$A_I y^I(t) + y(t) = k_{НОМ} x(t) \text{ или}$$

$$T_I y^I(t) + y(t) = k_{НОМ} x(t)$$

где  $T_I$  – постоянная времени – характеризует инерционность звена.

**Динамическое звено второго порядка** описывается уравнением:

$$A_2 y^{II}(t) + A_I y^I(t) + y(t) = k_H x(t)$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} y^{II}(t) + \frac{2\beta}{\omega_0} y^I(t) + y(t) = k_H x(t), \text{ где } \omega_0 - \text{частота собственных}$$

колебаний звена,  $\beta$  – коэффициент демпфирования.

### **Погрешности измерительных преобразователей.**

Различают:

а) **номинальную функцию преобразования** измерительного преобразователя  $y_{НОМ}=f_{НОМ}(x)$ , которую он должен иметь согласно государственным стандартам, техническим условиям и л другим нормативным документам.

б) **реальную функцию преобразования**  $y=f(x)$ , которую он имеет в действительности.

*Абсолютная погрешность* ИП по выходу – это разность значений  $f(x)$  и  $f_{НОМ}(x)$

при одном и том же значении входной величины.

*Абсолютная погрешность* ИП по входу – это разность  $\Delta x = x_{НОМ} - x$

где  $x$  – истинное значение входной величины

$x_{НОМ}$  – значение входной величины определяемое по номинальной функции преобразователя  $y_{НОМ}=f_{НОМ}(x)$

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
при значении выходной величины  $y_{ном}$ , соответствующей истинному значению  $x$ .

*Относительная погрешность ИП по выходу:*

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y}$$

*Относительная погрешность ИП по входу:*

$$\delta_x = \frac{\Delta y}{y}$$

*Приведенная погрешность ИП по выходу:*

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}}$$

где  $y_{\max}$  и  $y_{\min}$  – максимальное и минимальное значение выходной величины

*Приведенная погрешность ИП по входу:*

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}}$$

где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное значение входной величины

*Аддитивная погрешность ИП* – это погрешность, обусловленная неноминальным значением выходной величины при нулевом значении выходной:

$$\Delta y = y_0 - y_{0ном}$$

Мультипликативная погрешность ИП – это погрешность, обусловленная неноминальным значением чувствительности  $S$ .

$$\Delta y = [(S_{ном} + \Delta S)x + y_0] - [S_{ном} \cdot x + y_0] = \Delta S \cdot x$$

Абсолютная мультипликативная погрешность пропорциональна входной величине  $x$ .

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов

*Относительная мультипликативная погрешность:* при пропорциональной функции преобразования  $y = S_{\text{ном}} \cdot x$  равна относительному изменению чувствительности.

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta S \cdot x}{S_{\text{ном}} \cdot x} = \frac{\Delta S}{S_{\text{ном}}}$$

### **Структурные схемы соединения измерительных преобразователей в измерительных устройствах.**

Одним из методов уменьшения погрешности ИП является структурный метод. Измерительная цепь составляется из ИП таким образом, чтобы частные погрешности отдельных ИП взаимно компенсировались.

#### ***Последовательное соединение ИП***

Последовательной схемой соединения ИП называется такая, при которой входной величиной каждого последующего ИП служит выходная величина предыдущего. Входной величиной первого ИП является измеряемая величина.

При последовательном соединении ИП чувствительность прибора равно произведению чувствительностей входящих в него ИП.

$$S = S_1 S_2 S_3 S_4$$

При последовательном соединении измерительных преобразователей, имеющих пропорциональные функции преобразования, приведенная погрешность измерительного устройства равна сумме приведенных погрешностей составляющих измерительных преобразователей.

В соответствии с полученными выражениями можно определить погрешность измерительного устройства при известных погрешностях составляющих ИП (например, если погрешности систематические).

Если же погрешности случайные, то их значения не известны, но часто известны вероятностные параметры точности (среднеквадратическая погрешность, предельные погрешности).

Например, для приведенной схемы из трех ИП абсолютное значение среднеквадратичной погрешности при независимости частных погрешностей:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 S_2^2 S_3^2 + \sigma_2^2 S_3^2 + \sigma_3^2}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - абсолютные значения среднеквадратической погрешности соответствующих ИП.

Приведенная среднеквадратическая погрешность при пропорциональной функции преобразования определяется выражением:

$$\sigma_{np1} = \sqrt{\sigma_{np1}^2 + \sigma_{np2}^2 + \sigma_{np3}^2}$$

где  $\sigma_{np1}, \sigma_{np2}, \sigma_{np3}$  - приведенные среднеквадратические погрешности соответствующих ИП.

В этих двух выражениях: геометрическое сложение.

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} = \frac{S_2 S_3 \Delta y_1 + S_3 \Delta y_2 + \Delta y_3}{y_{\max} - y_{\min}} = \frac{S_2 S_3 \Delta y_1}{S_2 S_3 (y_{1\max} - y_{1\min})} + \frac{S_3 \Delta y_2}{S_3 (y_{2\max} - y_{2\min})} + \frac{\Delta y_3}{y_{3\max} - y_{3\min}} = \gamma_{y1} + \gamma_{y2} + \gamma_{y3}.$$

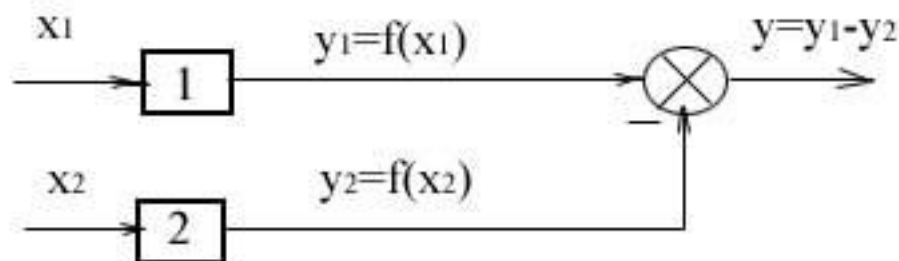
### Дифференциальные схемы соединения ИП

*Дифференциальная схема* – это схема, содержащая два канала с последовательным соединением ИП, причем выходные величины каждого канала подаются на два входа вычитающего преобразователя.

*Вычитающий преобразователь* – это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого представляет собой нечетную функцию разности двух входных:  $y = F(y_1 - y_2)$

В частности:  $y = y_1 - y_2$ .

Структурная схема дифференциального преобразователя:



Величина, подаваемая на сектор “–”, вычитается из величины, подводимой к другому сектору.

Оба канала дифференциальной схемы делаются одинаковыми и находятся в одинаковых рабочих условиях.

$$S = \frac{dy}{dx}$$

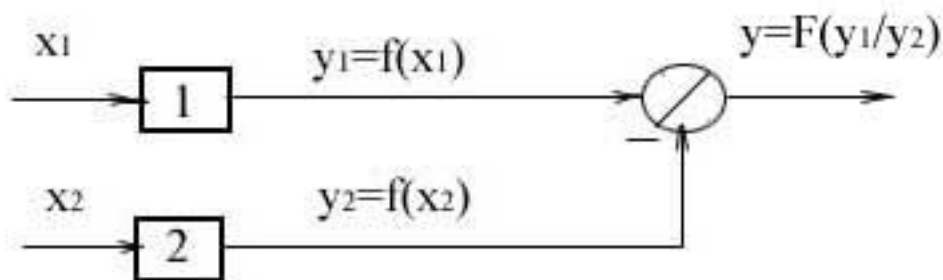
### Логометрическая схема соединения ИП

*Логометрическая схема включения ИП* имеет два канала с последовательным соединением ИП, выходные характеристики которых подаются на логометрический преобразователь.

*Логометрический преобразователь* – это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого является функцией частного от деления входных величин:

$$y = F\left(\frac{y_1}{y_2}\right)$$

Оба канала логометрической схемы, как и в дифференциальной схемы, выполняются одинаковыми и находятся в одних и тех же условиях.



### Компенсационные схемы включения ИП.

Измерительные устройства, созданные по компенсационной схеме (схеме с обратной связью), имеют малую как аддитивную, так и мультипликативную погрешности. Применение обратной связи позволяет создать устройства, обладающих малой статической и динамической погрешностью. Эти устройства имеют большую входную и выходную мощность и их показатели мало зависят от нагрузки.

Входная величина  $x$  подается на один из входов вычитающего преобразователя, а на другой его вход подается сигнал  $x_{oc}$  той же физической природы, что и выходная величина  $x$ , причем размер величины  $x_{oc}$  определяется размером выходной величины  $y$ . Разность  $\Delta x = x - x_{oc}$  поступает в ИП1.

Пусть ИП 1 и 2 имеют линейные функции преобразования:

$$y = S_1 \cdot \Delta x$$

$$x_{oc} = S_2 \cdot y$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – чувствительности ИП 1 и 2.

$$\text{Тогда } x_{oc} = S_2 y = S_1 S_2 \Delta x = S_1 S_2 (x - x_{oc})$$

$$x_{oc} = S_1 S_2 x - S_1 S_2 x_{oc}$$

$$(S_1 S_2 + 1) \cdot x_{oc} = S_1 S_2 x$$

$$S_1 S_2 \gg 1 \Rightarrow S_1 S_2 + 1 \approx S_1 S_2 \text{ тогда } x_{oc} \approx x$$



Учтем, что  $x_{oc}=f(y)$

Тогда  $y = f^{-1}(x_{oc}) \approx f^{-1}(x)$  где  $f^{-1}$  - функция, обратная функции  $f$ .

### **Классификация основных видов измерительных преобразователей**

В зависимости от вида входного и выходного сигналов ИП бывают:

1. Аналоговые ИП, имеющие аналоговые сигналы на входе и на выходе,
2. Аналого-цифровые ИП, имеющие на входе аналоговый сигнал, а на выходе кодированный сигнал,
3. Цифро-аналоговые, у которых на входе кодированный сигнал, а на выходе – аналоговый (квантованный сигнал).

### **Аналого-цифровые преобразователи**

*Аналого-цифровые преобразователи* – это ИП, автоматически преобразующие измеряемую аналоговую величину в дискретную, представленную в виде цифрового кода. АЦИП осуществляет дискретизацию, квантование и кодирование измерительной информации.

*Дискретизацией* непрерывной во времени величины  $x(t)$  называется процесс ее преобразования в прерывную во времени величину, т. е. получение отсчетов измеряемой величины в определенные дискретные моменты времени. Таким образом значения полученной величины совпадают с соответствующими значениями  $x(t)$  только в определенные моменты времени.

Промежуток времени между двумя последовательными отсчетами называется *шагом дискретизации*, который может быть постоянным или переменным.

*Квантование (квантование по уровню)* – это замена непрерывных значений величины  $x(t)$  конечным набором ее дискретных значений  $x_n$ . Фиксированные значения квантованной величины называются уровнями квантования, а разность между двумя ближайшими уровнями – *ступенью* или *шагом квантования*, или *квантом*.

Кодирование – это процесс представления численного значения измеряемой величины определенной последовательностью цифр или сигналов, т. е. кодом.

При преобразовании измеряемой величины в квантовую имеет значение правило установления равенства (способ отождествления) измеряемой и квантованной величины. Отождествление может производиться с ближайшим большим или равным, ближайшим меньшим или равным, а также с ближайшим уровнем квантования.

Число возможных уровней квантования определяется устройством АЦИП. От числа уровней квантования зависит ёмкость (число возможных отсчетов) отсчетного устройства. Например, если у АЦИП отсчетное устройство имеет максимальное показание 999, то такой АЦИП бесконечное множество значений измеряемой величины в пределах от 0 до 999 отражает всего 1000 различными показаниями, т. е. в этом АЦИП измеряемая величина преобразуется в квантованную, имеющую 1000 уровней квантования.

В результате квантования измеряемой величины по уровню возникает погрешность дискретности (квантования по уровню), обусловленная тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается лишь ограниченным рядом кодовых комбинаций.

Очевидно, что в большинстве случаев измерений имеется разность между значениями кодовых комбинаций АЦИП и размерами измеряемой величины в момент измерений. Эта разность является абсолютной погрешностью.

При идеальном преобразовании измеряемой непрерывной величины в квантованную и в код полученная погрешность равна погрешности дискретности.

Погрешность дискретности не является препятствием для увеличения точности АЦИП, так как соответствующим выбором числа уровней квантования погрешность дискретности можно сделать достаточно малой.

Иногда появляется необходимость восстановления всех значений непрерывной измеряемой величины по ряду измеряемых мгновенных значений. Практически это удается сделать всегда с погрешностью, носящей название *погрешности аппроксимации*.

Если АЦИП предназначена для получения результатов измерений, по которым будут восстанавливаться все промежуточные непрерывные значения измеряемой

величины, то быстродействие таких ИП выбирается с учетом допускаемой погрешности аппроксимации, способа аппроксимации и характера изменения измеряемой величины.

## Основные виды АЦИП

### АЦИП с время – импульсным преобразованием

В основу время - импульсного метода положено преобразование измеряемой величины в интервал времени, заполняемый затем импульсами со стабильной частотой следования (счетными импульсами). АЦИП, использующие этот метод применяются для преобразования временного интервала, напряжения, частоты, разности фаз и других величин в код.

Упрощенная схема АЦИП с время – импульсным преобразованием:

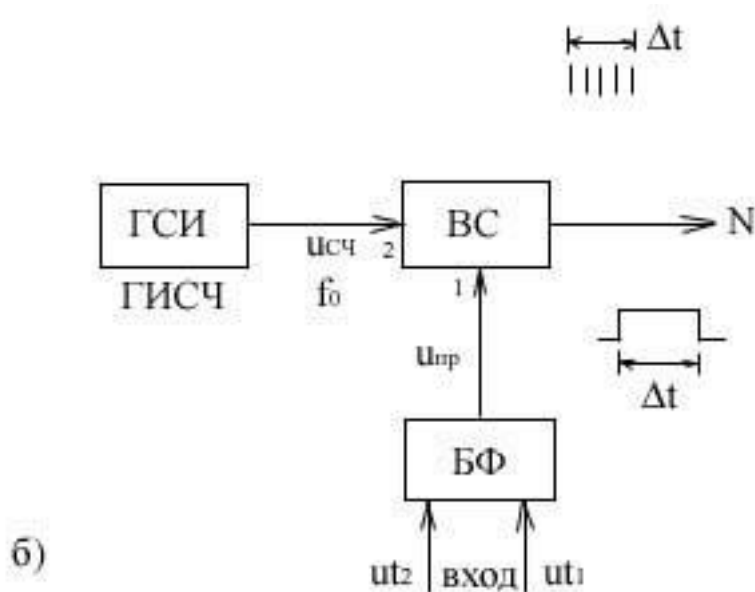
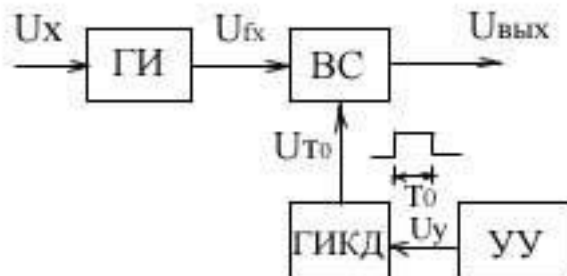


Схема включает в себя два преобразователя 1 и 2(а).

### АЦИП с частотно-импульсным преобразованием

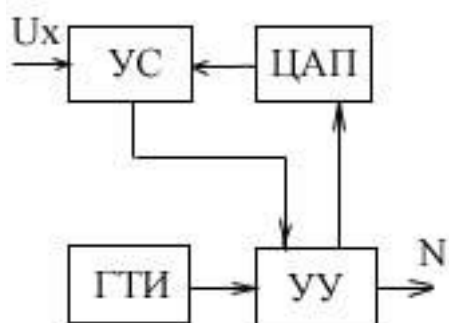
В частотно-импульсных АЦИП входная аналоговая величина (например, напряжение  $U_x$ ) предварительно преобразуется в частоту следования импульсов  $f_x$ . Цифровой код формируется посредством этими импульсами временного интервала строго определенной длительности  $T_0$ .

Структурная схема:



3) АЦИП поразрядного уравнивания

Структурная схема:

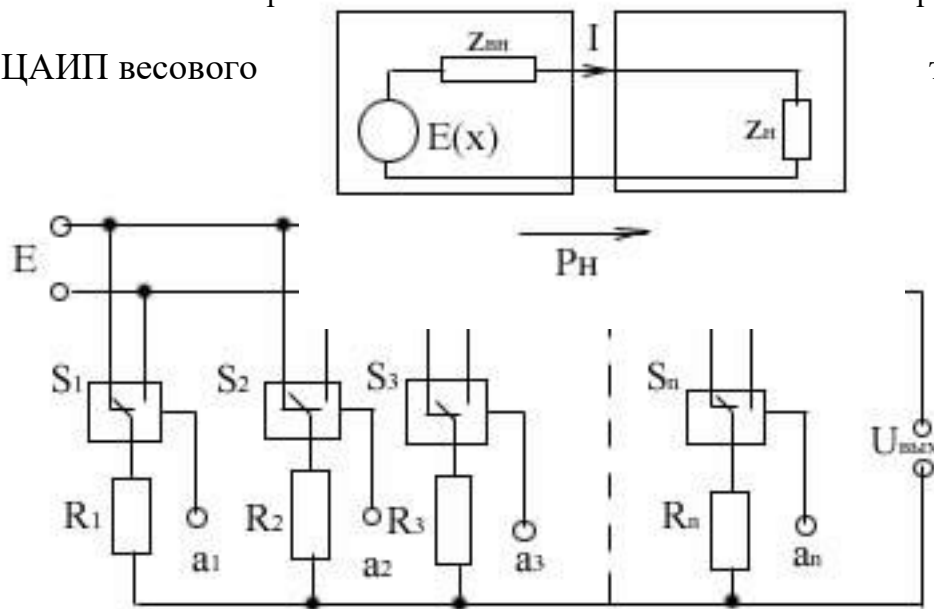


### Цифро-аналоговые ИП

ЦАИП преобразуют цифровой код в аналоговую величину, однородную с измеряемой (в схемах ЦИУ). Они также устанавливаются в цепях обратной связи в различных информационно-измерительных системах.

Схема ЦАИП весового

типа:



### Параметрические и генераторные преобразователи неэлектрических величин в электрические

По виду выходной электрической величины ИП подразделяется на:

- генераторные с выходной величиной ЭДС  $E=f(x)$  или  $I=f(x)$  и внутренним сопротивлением  $Z_{вн}=\text{const}$ .
- параметрические с ЭДС  $E=0$  и выходной величиной в виде изменения  $R$ ,  $L$  или  $C$  как функции  $x$ .

### Измерительные цепи генераторных преобразователей

Генераторные ИП характеризующие выходной ЭДС  $E(x)$ , являются функцией входной величины  $x$ , и внутренним сопротивлением  $z_{вн}$ . Эти две величины

определяют мощность  $P_{к.з.} = \frac{E^2}{z_{вн}}$ , развиваемую ИП в режиме короткого замыкания,

т. е. расходуемую лишь на внутреннем сопротивлении.

Мощность  $P_H$ , отдаваемая генераторным ИП последующему преобразователю, имеющему сопротивление  $Z_H$ , определяется мощностью короткого замыкания  $P_{кз}$  и некоторым безразмерным коэффициентом  $k$ , характеризующим эффективность использования возможностей генер. ИП,

М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
(эффективностью преобразования), которая зависит только от соотношения сопротивлений  $Z_{BH}$  и  $Z_H$ .

На рисунке показано изменение  $k$  в виде функции  $a$  при изменении  $a$  от  $10^{-3}$  до  $10^3$  (в логарифмическом масштабе).  $k_{\max} = \frac{1}{4}$  при  $a=1$  т. е.  $R_{BH}=R_H$ .

Если оба сопротивления представляют собой комплексные величины  $Z_{BH}$  и  $Z_H$ , то

$k = \frac{P_H}{P_{k.3.}}$  это отношение полных мощностей, причем кривая  $k(a)$  практически не

отличается от приведенной на рисунке, но значение максимума зависит от соотношения аргументов  $f_{BH}$  и  $f_H$  комплексных величин  $Z_{BH}$  и  $Z_H$ .

Общая закономерность, которую следует иметь в виду при проектировании ИП, гласит, что максимальная мощность в нагрузке  $R_H$  ген. ИП, а следовательно, и максимум эффективности преобразования, достигается при согласовании модулей нагрузки и внутреннего сопротивления ИП, т. е. при  $a=1$  или  $Z_H=Z_{BH}$ .

Поскольку максимум кривой  $k(a)$  весьма пологий, то на практике принимают  $a=0,2-5$ .

Иногда от условий согласования отступают с целью уменьшения погрешностей измерительной аппаратуры. Например, при прохождении относительно большого тока (больше  $1\text{ мкА}$ ) через гальванический ИП на его электродах возникают явления поляризации, что изменяет значение результирующей ЭДС. Поэтому здесь выбирают входное сопротивление цепи из условия  $R_H > 1000 R_{BH}$ .

### Измерительные цепи параметрических ИП

Сопротивление параметрического ИП является функцией измеряемой величины  $R=f(x)$  и может выражено как  $R=R_0+\Delta R(x)$ . Характеристиками параметрического ИП являются допустимая мощность рассеяния  $P_{\text{доп}}$ , начальное сопротивление  $R_0$  и относительное изменение сопротивления  $E = \frac{\Delta R}{R_0}$ . С параметрическим ИП

применяют три вида измерительных цепей: цепи последовательного включения, цепи в виде делителей и цепи в виде мостов.

Условием согласования сопротивлений преобразователя и нагрузки для цепи последовательного включения является:  $a = \frac{1}{3}$  или  $R_H = \frac{1}{3} R_0$  ( $a = \frac{R_H}{R_0}$ ). При выполнении условия согласования мощность образующего сигнала составляет

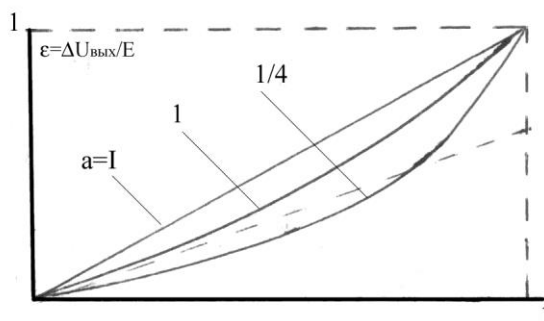
$$P_H = \frac{3}{16} P_{gon} \cdot E^2.$$

Зависимость эффективности преобразования  $k = \frac{P_H}{P_{gon} E^2}$  от  $a$  для параметрических

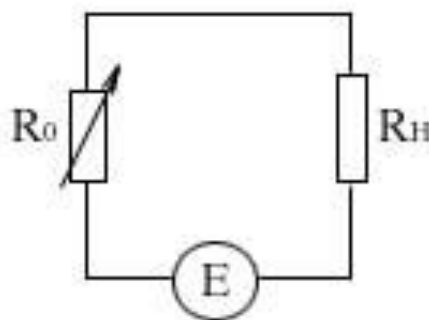
ИП показана на рис. Максимум кривой получается гораздо более острым, а условия согласования для параметрических ИП должны выполняться строже, чем для генер. ИП.

Измерительные цепи последовательного включения и цепи в виде делителей характеризуются нелинейной зависимостью между  $\Delta U_{вых}$  и  $E$ , причем с увеличением  $E$  погрешность нелинейности возрастает. При включении в цепь делителя дифференциального преобразователя погрешность нелинейности может быть уменьшена при увеличении  $a$  и становится равной нулю  $a \rightarrow \infty$  (т. е.  $R_H \rightarrow \infty$ ). Для обеспечения линейности приходится значительно отступать от согласованного значения нагрузки.

Основным недостатком как цепей последовательного включения, так и цепей в виде делителей является то, что значению  $x=0$  соответствует выходное напряжение  $U_{вых} \neq 0$ .



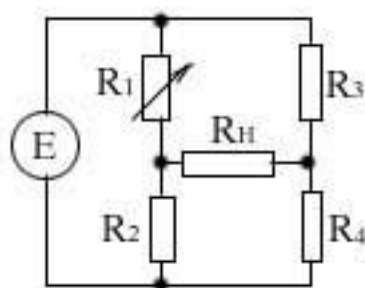
**Измерительная цепь параметрического ИП последовательного типа.**



**Цепь с делителем**

(неравновесная цепь)

Принцип построения неравновесных мостовых цепей состоит в исходной



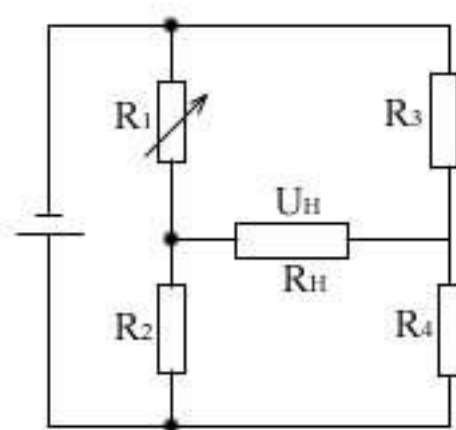


М.С.Степанов. Теория, расчет и проектирование измерительных преобразователей и приборов  
компенсации исходного значения выходного сигнала, чтобы при  $x=0$  он был равен нулю.

Для этого к делителю  $R_1, R_2$ , содержащему ИП  $R_1$ , добавляется еще один делитель  $R_3, R_4$ , так, чтобы напряжение  $U_H$  и ток  $I_H$  на нагрузке  $R_H$  при  $x=0$  отсутствовал. При отклонении  $x$  от  $0$  мост выходит из состояния равновесия, в следствии чего  $I_H = f_1(x)$  и  $U_H = f_2(x)$ .

Таким образом, состояния состояние равновесия ( $I_H=0$ ) устанавливают перед началом измерения ( $x=0$ ). Условие достижения равновесия:  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$  или

$R_2 R_3 = R_1 R_4$  (для одинарного моста постоянного тока). Выходной так:

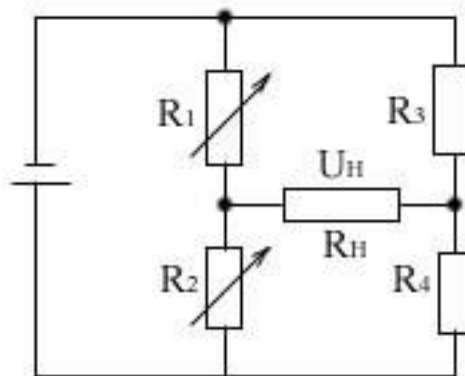


$$I_H = E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_H (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}$$

где  $E$  – напряжение питания моста.

$$\text{или: } I_H = I_E \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_H (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)};$$

где  $I_E$  - ток питания моста.



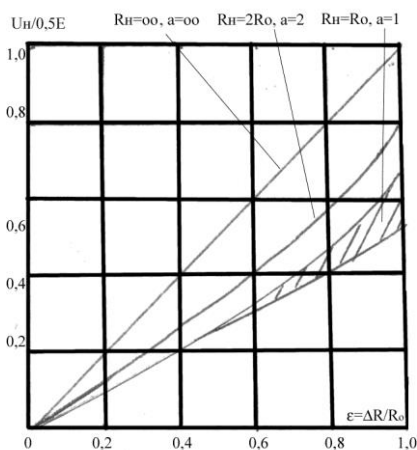
Функция преобразования неравновесного моста с дифференциальным ИП:

а) В состоянии равновесия сопротивления всех плеч равны  $R_0$  при заданном напряжении питания  $E = \text{const.}$   $U_H = \frac{1}{2} E \cdot \frac{1}{1 + R_0/R_H (1 - E^2/2)}$ ;  $\frac{\Delta R}{R_0}$

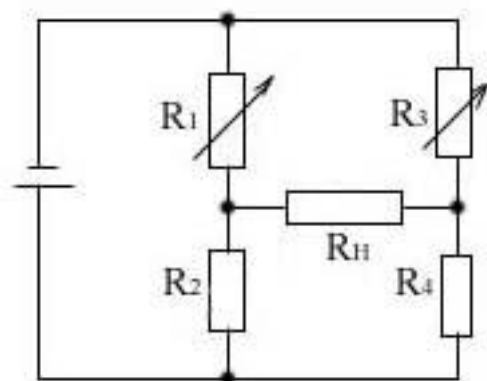
При этом линейность функции преобразования соблюдается, так же как и для цепи в виде делителя, лишь при  $R_H = \infty$ .

б) Если задан тока питания моста  $I_E = \text{const.}$ , то функция преобразования линейна

при любых  $R_H$ :  $U_H = \frac{1}{2} I_E \cdot R_0 \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_H}}$



Если дифференциальный ИП включен в плечи  $R_1$  и  $R_3$ , то а) в режиме заданного напряжения питания  $E = \text{const.}$  Функция преобразования нелинейна при любых  $R_H$ :



б) в режиме заданного тока питания  $I_E = \text{const}$ .

Измерительные мосты могут также работать на переменном токе, при этом сопротивления плеч являются комплексными.

Условия равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид:  $Z_1 Z_2 = Z_2 Z_3$  где  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – комплексные сопротивления плеч. Но  $Z$  можно представить в виде:  $Z = ze^{jf}$ . Поэтому:  $z_1 e^{jf_1} z_4 e^{jf_4} = z_2 e^{jf_2} z_3 e^{jf_3}$  откуда  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$  и  $f_1 + f_4 = f_2 + f_3$

Можно записать иначе:  $Z = R + jx \Rightarrow (R_1 + jx_1)(R_4 + jx_4) = (R_2 + jx_2)(R_3 + jx_3)$

$$R_1 R_4 - x_1 x_4 + j(R_1 x_4 + R_4 x_1) = R_2 R_3 - x_2 x_3 + j(R_2 x_3 + R_3 x_2)$$

Откуда 
$$\begin{cases} R_1 R_4 - x_1 x_4 = R_2 R_3 - x_2 x_3 \\ R_1 x_4 - R_4 x_1 = R_2 x_3 + R_3 x_2 \end{cases}$$

Полученные две пары равенств (условий равновесия) полностью равноправны и выбор того или другого определяется соображениями удобства. Чтобы обеспечить выполнение других условий одновременно, необходимо иметь не менее двух регулируемых элементов (как правило резисторы и конденсаторы, т. к. они допускают более точную регулировку, чем катушки индуктивности).

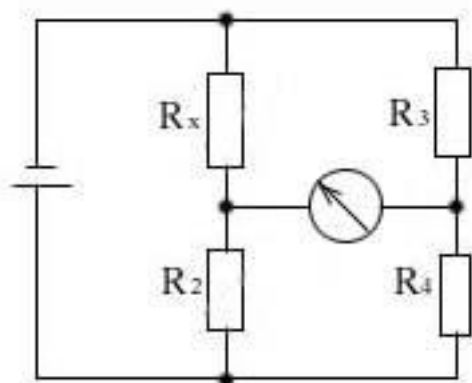
Чувствительность мостов: это отношение изменения сигнала на выходе ( $I, U, P$ ) к вызвавшему его изменению измеряемой величины ( $R, C$  и др.):

$$S = \frac{dY}{dX} \text{ или с использованием конечных приращений } S \approx \frac{\Delta Y}{\Delta X} \text{ причем}$$

приращение  $\Delta X$  берется вблизи равновесия.

Если рассматривается мост постоянного тока, то выходной величиной является отклонение стрелки гальванометра, а входной – измеряемое сопротивление  $R_x = R_1$ .

Тогда 
$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R_1} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta I_2} \cdot \frac{\Delta I_2}{\Delta R_1} = S_2 \cdot S_{сх}$$



где  $\Delta I_Г$  – ток, протекающий через рамку гальванометра;

$S_Г$  – чувствительность гальванометра;

$S_{схI}$  – чувствительность мостовой схемы к току.

Аналогично чувствительность мостовой схемы к

напряжению  $S_{схU} = \frac{\Delta U_2}{\Delta R_1}$  и к мощности  $S_{сх.p} = \frac{\Delta P_2}{\Delta R_1}$ .

Здесь  $\Delta U_2$  и  $\Delta P_2$  – приращения напряжения и

мощности в цепи гальванометра.

### Измерительные преобразователи с упругими элементами

Входной величиной, воздействующей на упругие элементы ИП, является сосредоточенная сила, крутящий момент, давление газа или жидкости.

Возникающая под действием этих величин деформация упругого элемента воспринимается или непосредственно наблюдателем, или последующим ИП с естественной упругой величиной в виде механического перемещения, скорости этого перемещения или механического напряжения (деформации).

При расчете упругих элементов стремятся обеспечить их максимальную чувствительность с учетом допустимых напряжений, возникающих в конструкции.