Лекция № 2.

Структуры измерительных систем и их характеристики.

Для описания измерительных систем применяются структурные схемы, состоящие из функциональных элементов (функциональных блоков ФБ, измерительных преобразователей ИП), связанных между собой входными и выходными сигналами.

Входной величиной средства измерений, например, измерительного прибора, является измеряемая величина, а выходной – изменение состояния отсчетного устройства, например показания стрелочного прибора. Входные величины могут изменяться во времени и быть распределенными в пространстве. В этих случаях следует говорить об исследуемых процессах: временных или пространственных. Различают стационарные и нестационарные процессы, и соответственно – статические и динамические измерительные системы, в которых взаимосвязи входных и выходных величин будут описываться статическими и динамическими характеристиками.

Статические характеристики средств измерений:

1. Функция (характеристика) преобразования – функциональная зависимость выходной величины y от входной x, которая может быть задана формулой, таблицей, графиком. В аналитическую функцию преобразования $y = f(x)$ обычно входят конструктивные параметры прибора или функционального преобразователя, используемые при их расчете или проектировании. Функция преобразования реального преобразователя определяется экспериментально. Желательно, чтобы функция преобразования была линейной: $y = Sx + y_0$. (2.1)

2. Чувствительность преобразования S - отношение изменения выходной величины прибора или измерительного преобразователя к вызвавшему ее изменению входной величины $S = dy/dx \approx \Delta y/\Delta x$. (2.2)

Чувствительность может быть определена при любом способе задания функции преобразования. В частном случае линейного преобразования $S = y/x$, где y - значение выходной величины, соответствующей входной x. Возможно задание относительной чувствительности преобразования – $S_0 = \Delta y/(\Delta x/x)$.

3. Порог чувствительности Δx - изменение значения измеряемой величины, способное вызвать наименьшее обнаруживаемое изменение выходной величины. Порог чувствительности препятствует обнаружению сколь угодно малых сигналов. Это обусловлено наличием в любой физической системе случайных флуктуаций (шум), затрудняющих выявление сигнала на фоне шума. Шум в измерительной системе может быть вызван многими причинами, такими как тепловые флуктуации (шум резистора), квантовый характер потока носителей зарядов (дробовой шум в полупроводниках) и т. д. Существуют и другие источники возмущений, например, механические дефекты (трение, люфт), механические вибрации, электрические наводки, ухудшающие порог чувствительности. Однако эти факторы могут быть устранены, часто простым изменением конструкции измерительной системы. Теоретически достижимый порог чувствительности (предельный порог чувствительности) определяется собственными шумами системы и может быть определен как наименьший входной сигнал, который можно обнаружить с определенной степенью достоверности на фоне собственного шума измерительной системы. Например, при условии, что отношение «сигнал/шум» на выходе этой системы равно единице.

4. Статические погрешности средств измерений. Каждое измерение сопровождается погрешностью. Различают систематические и случайные, абсолютные и относительные, основные и дополнительные погрешности измерений, источники и причины которых будут системно проанализированы в курсе метрологии измерений. Здесь же рассмотрим погрешности, вызванные отклонением функции преобразования измерительной системы от номинальной характеристики, описываемой соотношением (2.1). Погрешность, обусловленная изменением значений y_0 при нулевом значении входной величины x, называется *аддитивной* погрешностью, или погрешностью нуля преобразования. Погрешность, вызванная отклонением значения S от номинального, называется *мультипликативной*, или погрешностью чувствительности преобразования. Аддитивная погрешность не зависит от значения входной величины, а мультипликативная погрешность пропорциональна входной величине.

5. Статическая нелинейность. В измерительной системе с независящей от частоты чувствительностью (статические системы) соотношение между выходным сигналом и входным, как правило, линейно. Реальная измерительная система не является идеально линейной, она всегда линейна лишь приближенно (например, в малом интервале значений входного сигнала). Причинами отклонений от линейности являются: гистерезис, мертвая зона, насыщение. Степень статической (частотно-независимой) нелинейности определяется соотношением:

$$\left|\frac{f(x)-ax}{ax}\right|, \tag{2.3}$$

$f(x)$ - реальная зависимость между y и x, а $y=ax$ - линейное приближение $f(x)$.

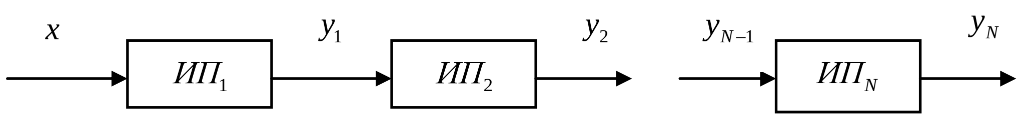
6. Помимо перечисленных, ***статическими характеристиками*** измерительных систем являются: *пределы измерений* – наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины, для которых нормированы погрешности; *диапазон измерений* – область значений, заключенная между верхним и нижним пределами измерений; *надежность* – способность сохранять заданные характеристики средства измерения в течение заданного времени.

Структурные схемы средств измерений

При создании измерительных систем используют различные схемы соединения измерительных преобразователей (функциональных блоков). Различают *разомкнутые структуры*, основанные на методе прямого преобразования сигналов, и *замкнутые структуры (компенсационные)*, реализующие метод уравновешивающего преобразования.

Структуры разомкнутого типа:

1. *Последовательной схемой* соединения измерительных преобразователей называется такая, у которой входной величиной каждого последующего преобразователя служит выходная величина предыдущего.



Здесь $y_1 = f_1(x)$; $y_2 = f_2(y_1)$; …, $y_N = y = f_N(y_{N-1})$. Общая функция преобразования равна:

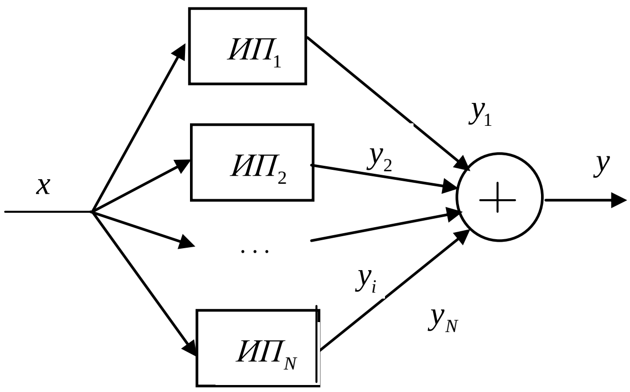
$$y = f_N\left\{ f_{N-1} ... \left[f_1(x) \right] \right\}. \tag{2.4}$$

Из соотношений (2.2) и (2.4) несложно получить:

$$S = {dy}/{dx} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot ... \cdot S_N = \prod_{i=1}^{N} S_i \,. \tag{2.5}$$

Таким образом, при последовательном соединении преобразователей чувствительность измерительной системы в целом равна произведению чувствительностей входящих в него преобразователей (функциональных блоков).

2. *Параллельная структура* соединения измерительных преобразователей приведена на рисунке:

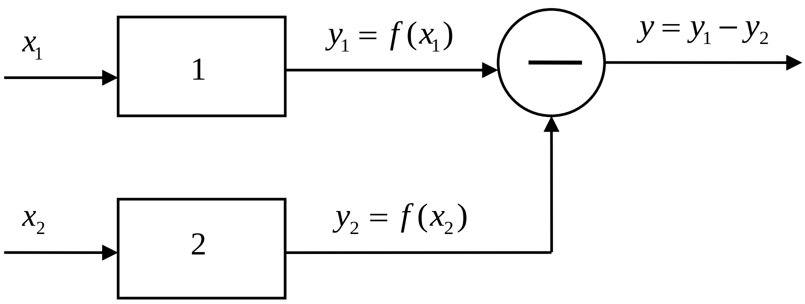


Здесь $y = y_1 + y_2 + ... + y_N$. Очевидно, чувствительность этой измерительной системы равна: $S = {dy}/{dx} = \sum_{i=1}^{N} S_i$, (2.6)

где S_i - чувствительность каждого измерительного преобразователя $ИП_i$.

3. *Параллельно-последовательная структура* соединения измерительных преобразователей является комбинацией первых двух структур. В этой структуре органически сочетается параллельный принцип получения и последовательный способ преобразования измерительных сигналов. Для согласования частей измерительного тракта, работающих по этим принципам, применяются коммутаторы, связывающие между собой участки измерительных преобразователей, работающих в параллельном и последовательном режимах.

4. *Дифференциальные схемы* соединения преобразователей содержат два канала с последовательным соединением преобразователей, при этом выходные величины каждого из каналов подаются на входы вычитающего преобразователя. Оба канала дифференциальной схемы, представленной на рисунке, делаются одинаковыми и находятся в одинаковых рабочих условиях:

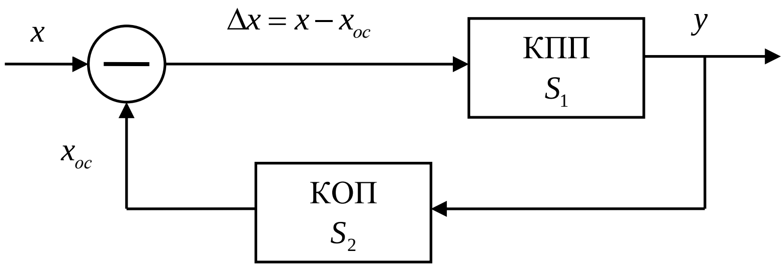


В дифференциальной схеме первого типа измеряемая величина воздействует на вход первого канала, а на вход второго подается постоянное значение физической величины той же природы, что и измеряемая: $x_1 = x_{изм}$; $x_2 = const$ Если преобразователи 1 и 2 имеют линейную функцию преобразования: $y_1 = Sx_1 + y_0$, $y_2 = Sx_2 + y_0$, то выходная величина дифференциального преобразователя равна: $y = S(x_1 - x_2)$. Таким образом, в дифференциальных схемах компенсируются аддитивные погрешности каналов 1 и 2.

В дифференциальной схеме второго типа измеряемая величина после некоторого преобразования воздействует на оба канала, причем на входе одного канала входная величина возрастает, а на входе другого – уменьшается: $x_1 = x_0 + x_{изм}$, $x_2 = x_0 - x_{изм}$. Здесь $x_0 = const$. Очевидно, в случае линейных преобразователей: $y = f(x_1) - f(x_2) = 2Sx$, и чувствительность дифференциального преобразователя в 2 раза больше чувствительности каждого из каналов. При этом увеличивается величина линейного участка рабочей характеристики преобразователя и компенсируются аддитивные погрешности каналов.

Структуры замкнутого типа (компенсационные):

Компенсационные схемы соединения измерительных преобразователей (схемы с обратной связью) позволяют компенсировать как аддитивную, так и мультипликативную погрешности измерений. Структурная схема компенсационного преобразователя приведена на рисунке и содержит два канала преобразования – прямой КПП и обратный КОП:



Входная величина x подается на один из входов вычитающего преобразователя, на другой вход поступает формируемый каналом КОП сигнал обратной связи той же физической природы, что и входная величина. Разность $\Delta x = x - x_{oc}$ поступает в канал прямого преобразования КПП. Если преобразователи КПП и КОП имеют линейные функции преобразования с чувствительностью соответственно S_1 и S_2, то

$$y = S_1 \cdot \Delta x, \tag{2.7}$$

$$\text{а} \quad x_{oc} = S_2 \cdot y\,. \tag{2.8}$$

Тогда зависимость между входной величиной x и сигналом x_{oc} определяется соотношением:

$$x_{oc} = S_1 \cdot S_2 \cdot \Delta x = S_1 \cdot S_2 \cdot (x - x_{oc})\,. \tag{2.9}$$

Из (2.9) следует $(S_1 \cdot S_2 + 1)x_{oc} = S_1 \cdot S_2 \cdot x$ (2.10)

Произведение $S_1 \cdot S_2$ часто достаточно велико, поэтому $x \approx x_{oc}$. Это соотношение имеет место и при нелинейных характеристиках преобразователей. Если $x \approx x_{oc}$, то в соответствии с (2.8) выходной сигнал определяется чувствительностью преобразователя КОП и мало зависит от характеристик преобразователя КПП.

Из соотношений (2.7) и (2.8) нетрудно получить чувствительность схем с обратной связью:

$$S = {}^{y}\!/_{x} = {}^{S_1}\!/_{(1 + S_1 \cdot S_2)} \approx {}^{1}\!/_{S_2}\,, \tag{2.11}$$

что уменьшает мультипликативные погрешности, вызванные изменением S_1.