



ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

Буков Николай Николаевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ и ЭТАЛОНЫ

Факультет - химии и высоких технологий

Специальность - 27.03.01

"Стандартизация и сертификация" (ОДО)

1 курс

Измерение – научно обоснованный опыт для получения количественной информации с требуемой или возможной точностью о параметрах объекта измерения.

Измерение включает в себя следующие элементы:

- **объект измерения;**
- **цель измерения;**
- **условия измерения** (совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и объектов);
- **метод измерения** — совокупность приёмов использования принципов и средств измерений (принцип измерения – совокупность физических явлений положенных в основу измерения);
- **методика измерения** – установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов *в соответствии с данным методом.*
- **средства измерения:** меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, измерительно-информационные системы;
- **результаты измерений;**
- **погрешность измерений;**
- **качество измерений:** сходимость, воспроизводимость, единство, достоверность (характеристика случайной погрешности), правильность (близость к нулю систематической погрешности).

- **Классификация измерений.**
- Целесообразность классификации измерений обусловлена удобством разработки методов измерений и обработки результатов измерений. Измерения различаются:
- *По способу нахождения числовых значений* физических величин:
- **прямые;**
- **косвенные;**
- **совместные** – косвенные измерения, при которых значение физической величины находят путем измерения физических величин различной физической природы;
- **совокупные** – косвенные измерения, при которых значение физической величины находят путём нескольких однородных измерений других физических величин.
- **ПРИМЕР.** Для измерения объема параллелепипеда используют формулу $V=abc$ и проводят измерения его сторон.
- *По характеру точности результатов единичных измерений* при проведении многократных измерений:
- **равноточные** – измерения физических величин, выполненные одинаковыми по точности средствами измерений в одинаковых условиях;
- **неравноточные.**

- ***По виду физических величин***, измеряемых при прямых измерениях для получения результата косвенных измерений:
- **абсолютные** – измерения, основанные на прямых измерениях основных (в системе СИ) величин и на использовании значений физических констант;
- **относительные** – измерение отношения физической величины к одноименной.

При относительных измерениях широко используется внесистемная безразмерная единица измерения – децибел.

- ***По характеру зависимости измеряемой физической величины по времени:***
- **статические** – измерения физических величин постоянных во времени;
- **динамические** – измерения физических величин изменяющихся со временем;
- **квазистатические** – измерения физических величин изменяющихся со временем, но которые можно считать постоянными за время измерения.

Существуют более точные критерии квазистатических измерений, которые связаны с реакцией СИ на изменение измеряемой физической величины.

- ***По условиям определения точности результатов:***
- **метрологические** – измерения, проводимые с помощью эталонов, образцовых средств с целью воспроизведения единиц физических величин, для передачи их размеров рабочим средствам измерения;
- **технические** – измерения, проводимые с помощью рабочих средств.

Основные этапы измерений

- Измерение – последовательность действий, которые можно представить в виде следующих этапов:
- **Этап1. Постановка измерительной задачи**
- сбор данных об исследуемой физической величине и условиях измерения, т.е. накопление априорной информации об объекте измерения и её анализ;
- разработка физической модели объекта. При этом измеряемая физическая величина определяется как параметр или характеристика этого объекта;
- постановка измерительной задачи на основе принятой модели объекта измерения;
- формирование математической модели объекта (вывод формулы для вычисления результата при косвенных измерениях);
- выбор конкретных величин, посредством которых будет находиться значение измеряемой физической величины.

- **Этап 2. Планирование измерений.**
- выбор методов измерений непосредственно измеряемых физических величин и возможных средств измерений;
- оценка методических погрешностей измерения на основе выбранных физической и математической моделей;
- определение требований к метрологическим характеристикам средств измерений и условиям измерений;
- выбор СИ в соответствии с указанными требованиями;
- разработка математической модели СИ и оценка его систематических погрешностей;
- выбор методики измерений;
- обеспечение требуемых условий измерений и (или) создание возможности их контроля.
- **Этап 3. Измерительный эксперимент (реализация метода измерения)**
- обеспечение взаимодействия средств и объектов измерения;
- преобразование сигнала измерительной информации;
- регистрация результатов.
- **Этап 4. Обработка результатов измерений**

Размер физических величин

В настоящее время используются следующие понятия для характеристики размеров физических величин:

- истинное значение;
- действительное значение;
- измеренное значение.

Основной постулат теории измерений : *измеряемая физическая величина и её “истинное” значение существуют только в рамках принятой модели исследования*

- Измеряемая физическая величина определяется как один из параметров принятой модели.
- Модель объекта (в том числе и условия измерений) можно построить только при наличии априорной информации.

Типы шкал величин

Совокупность правил, позволяющих сопоставить системе объектов с их характеристиками систему цифровых данных или систему чисел, называют шкалой.

Номинальные шкалы

Шкалы наименований - шкалы, применяемые для индивидуальных объектов.

Присваивается номер в качестве имени объекта: агент 007, предприятие № 49, город Пенза-19. присвоение номера идет произвольно на первый взгляд. Но правило есть, хотя и очень слабое: нельзя присваивать одно имя двум разным объектам.

Соотношение в системе объектов – это идентичность объектов самим себе (тождество).

Шкалы классификации - шкалы, применяемые для классов объектов.

Единственное отношение в системе объектов, передаваемое номинальной шкалой - это соотношение эквивалентности.

Примеры: сборник образцов цветов, годные или негодные изделия и т.д.

Порядковые шкалы

Существенно более сильными являются порядковые шкалы (или ординарные шкалы). Здесь действуют соотношения строгого упорядочения состояний и эквивалентности.

Пример. Студенты после экзамена разбиваются на группы получивших оценки 2, 3, 4 и 5.

К порядковым шкалам относятся шкала Мооса для твердости минералов, построенная на 10 образцах которая носит название шкалы реперов, а также 12- бальная шкала Бофорта для силы морского ветра (см. таблицу) и международная сейсмическая шкала MSK - 64.

Интервальные шкалы

Эта и последующие шкалы являются метрическими.

С точки зрения отношений между состояниями здесь должны быть эквивалентность, строгое упорядочение состояний и строгое упорядочение интервалов.

Температурная шкала является типичным примером шкалы интервалов

Своеобразной интервальной шкалой является шкала времени, используемая для датирования событий. Здесь нет нуля, нет реперных точек. Есть эталонный интервал. Ноль – условный.

Масштабные шкалы

Масштабная шкала (или шкала отношений, или пропорциональная шкала). С точки зрения соотношений между состояниями здесь действуют эквивалентность, строгое упорядочение состояний, интервалов между ними и частных от деления состояний. Шкала должна иметь не условный, а естественный нуль. Тогда между состояниями возможно аддитивное отношение, т.е. возможно сложение.

Примеры шкал отношений: шкала длины, массы, электрического напряжения и т.д.

Натуральные (абсолютная) шкалы

Этим шкалам свойственны любые отношения, аналогичные отношениям чисел.

Здесь нет ни реперных точек, ни эталонных интервалов. Речь идет об измерении относительных величин (в естественных единицах), а также о процедуре счета.

Счет деталей, счет числа импульсов, счет людей и т.д. Измерение относительных величин: коэффициента усиления, коэффициента деления, эмпирической вероятности и т.д.

Основные признаки классификации шкал измерений

Признак типа шкалы измерений	Тип шкалы измерений					
	Наименований	Порядка	Разностей (интервалов)	Отношений		Абсолютные
				1-го рода	2-го рода	
Допустимые логические и математические соотношения между проявлениями свойств	Эквивалентность	Эквивалентность, порядок	Эквивалентность, порядок, суммирование интервалов	Эквивалентность, порядок, пропорциональность	Эквивалентность, порядок, суммирование	Эквивалентность, порядок, суммирование
Наличие нуля	Не имеет смысла	Необязательно	Устанавливается по соглашению	Имеется естественное определение нуля	Имеется естественное определение нуля	Имеется естественное определение нуля
Наличие единицы измерения	Не имеет смысла	Не имеет смысла	Устанавливается по соглашению	Устанавливается по соглашению	Устанавливается по соглашению	Имеется естественный критерий установления размера единиц
Многомерность	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна
Допустимые преобразования	изоморфное отображение	монотонные преобразования	монотонные преобразования	Умножение на число	Умножение на число	отсутствуют

Особенности реализации шкал измерений

Особенности реализации шкал	Тип шкалы измерений				
	Наименований	Порядка	Разностей	Отношений	Абсолютные
Введение единиц измерений	Принципиально невозможно ввести единицы измерений	Принципиально невозможно ввести единицы измерений	Есть возможность ввести единицы изменений	Есть возможность ввести единицы изменений	Есть возможность ввести единицы изменений
Необходимость эталона реализуемой шкалы	Шкалы могут реализовываться без специальных эталонов	Шкалы могут реализовываться без специальных эталонов	Большинство шкал реализуются только посредством специальных эталонов	Большинство шкал реализуются только посредством специальных эталонов	Шкалы могут быть реализованы без эталонов
Что должен воспроизводить эталон при его наличии	Весь используемый участок шкалы	Весь используемый участок шкалы	Какую либо часть или точку шкалы и условный ноль	Какую либо часть или точку шкалы	Обязательные требования отсутствуют

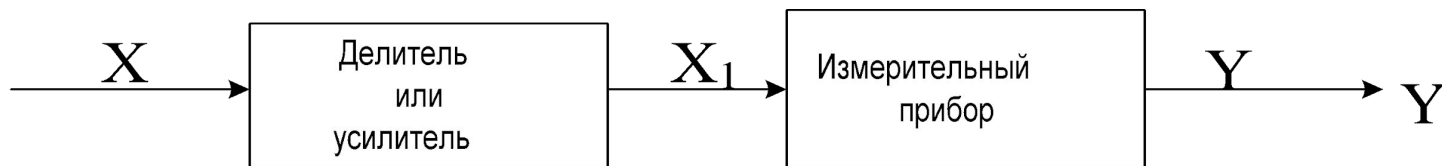
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ КАК МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ С МЕРОЙ

По существу все измерения сводятся к сравнению измеряемой физической величины с мерой (основное уравнение измерений).

1. Метод прямого сравнения

С мерой сравнивается вся физическая величина или величина ей пропорциональная.

Функциональная блок-схема



Существует несколько реализаций данного метода.

1.1. Метод непосредственной оценки

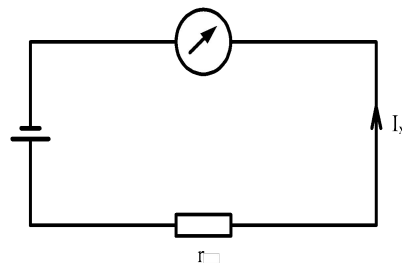
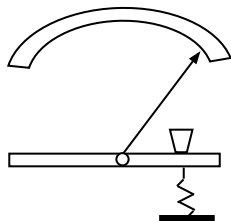
Это – простейший метод измерений, когда измеряемая физическая величина сравнивается однородной мерой непосредственно (без преобразования).

Примеры: Измерение длины с помощью линейки; взвешивание груза на равноплечих весах

1.2. Метод прямого преобразования

В этом методе вся измеряемая физическая величина сравнивается с мерой после прямого преобразования в последовательной измерительной цепи.

Примеры: Взвешивание груза с помощью пружинных весов, измерение тока с помощью амперметра



1.3. Метод масштабного преобразования

В данном методе измерение происходит с усилением (умножением) или с ослаблением делением измеряемой величины или сигнала в процессе прямого преобразования.

Пример. Измерение тока в участке цепи с помощью шунтированного амперметра.

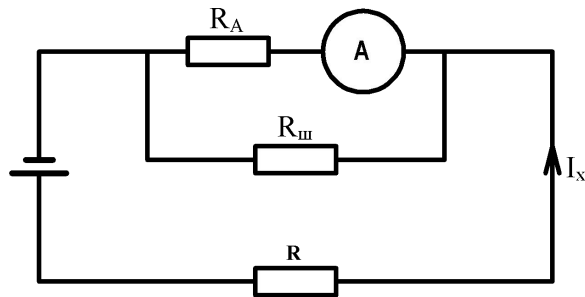


Рис.6

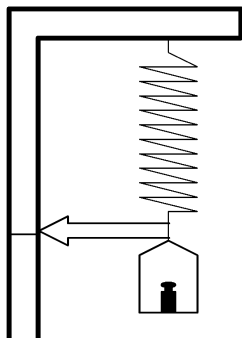
$$I_A = \frac{R_{ш}}{R_A + R_{ш}} I_x = \frac{1}{1 + \frac{R_A}{R_{ш}}} I_x$$

1.4. Метод замещения

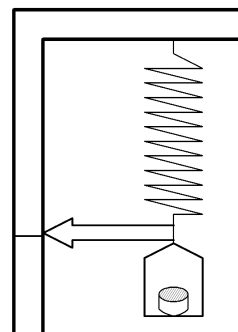
Это метод прямого сравнения, который выполняется в 2 этапа

Пример. Взвешивание груза.

1 этап



2 этап



На этапе 1 подвешивается груз и делается отметка на стойке. На этапе 2 объект заменяют на изменяемую меру (набор гирь), пока показания не сравняются с отметкой.

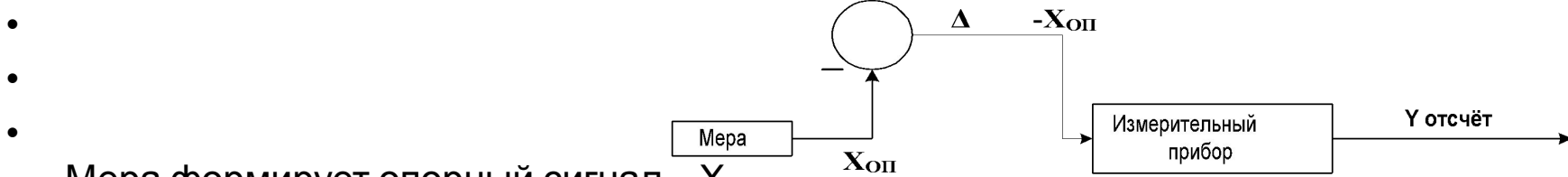
Основное достоинство этого метода – сводится к минимуму систематическая погрешность прибора.

- **2. Разностный (или дифференциальный) метод**
- Этот метод позволяет уменьшить сигнал на входе измерительного прибора и тем самым увеличить их точность за счет уменьшения мультипликативной погрешности. Это - один из наиболее точных методов. Существует несколько реализаций данного метода.

- **2.1. Компенсационный метод**

- В этом методе часть измеряемого сигнала компенсируется однородным сигналом, обеспечиваемым мерой.

- **Функциональная блок-схема метода**

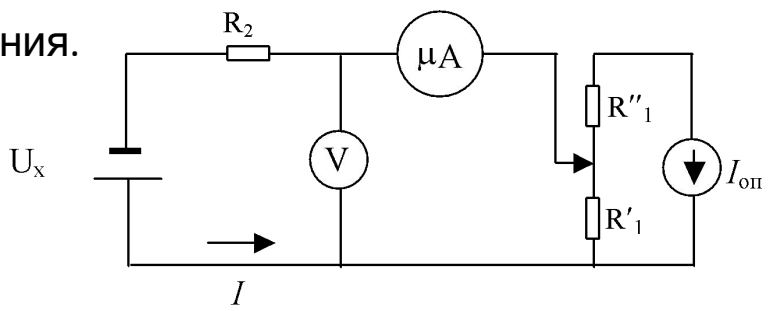


Мера формирует опорный сигнал – $X_{оп}$.

- **Пример 1.** Взвешивание груза. Вес груза частично компенсируется гирей. В результате стрелка отклоняется на малый угол.

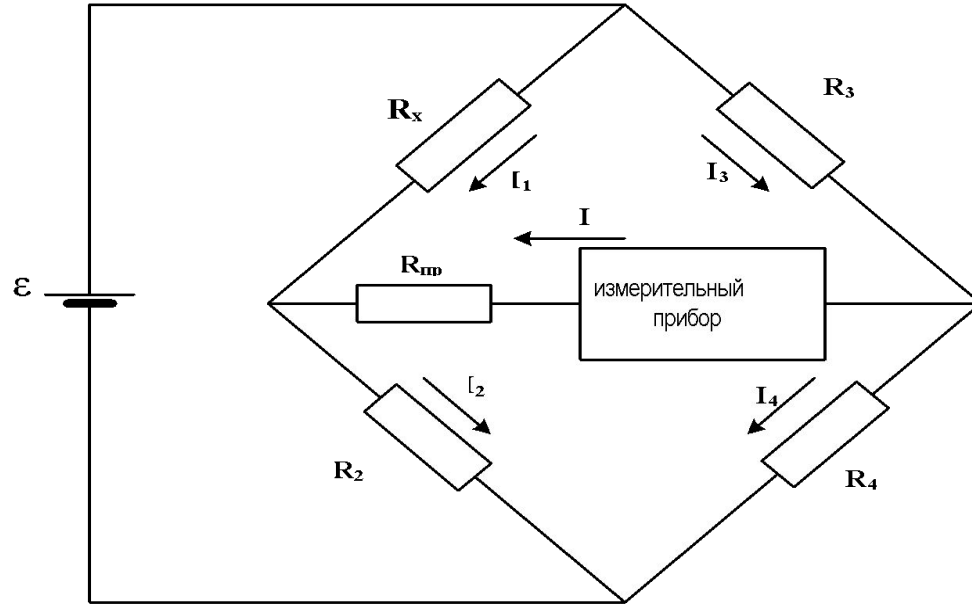


- **Пример 2.** Измерение ЭДС источника напряжения.



В этой схеме микроамперметр измеряет разность между напряжением V и напряжением на делителе, образованном резисторами R'_1 и R''_2 , питаемыми источником опорного тока.

- **2.2. Мостовой метод**
- Широко используется для измерения физических величин параметрического вида (сопротивление, индуктивность, ёмкость и т.д.), а также в системах регулирования.



- Ток через измерительный прибор можно вычислить по формуле

$$I = E \frac{R_x R_4 - R_2 R_3}{(R_x + R_2) [R_3 R_4 + R_{ш} (R_3 + R_4)] + (R_3 + R_4) R_x R_2}$$

Зная ток и сопротивления трех резисторов, можно найти неизвестное сопротивление. В этой формуле ток, измеряемый прибором, пропорционален разности сопротивлений, образующих данную схему. Поэтому данный метод относится к разностному.

2.3. Нулевые методы

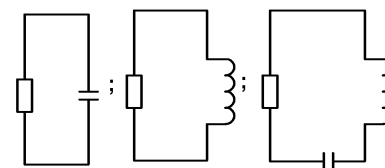
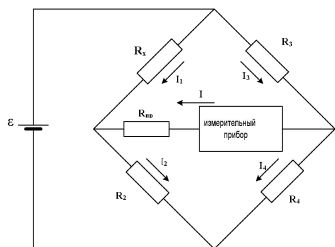
Разностные методы становятся нулевыми, если $\Delta x = 0$ (т.е. $x = x_{\text{оп}}$). Мостовой метод становится нулевым, если ток через измерительный прибор $I = 0$. В этом случае говорят, что мост уравновешен. Условие равновесия моста очевидно: $R_x R_4 = R_2 R_3$.

Если мост питается переменным напряжением и резисторы содержат реактивные элементы (емкости и индуктивности), то условие равновесия моста записывается в виде $Z_x Z_4 = Z_2 Z_3$. Здесь Z – комплексное число. Поэтому из условия равновесия следуют два условия:

для модулей Z : $|Z_x| |Z_4| = |Z_2| |Z_3|$

и для их фаз: $\varphi_x + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$

Резисторы, образующие мост и имеющие сопротивление Z , могут представлять собой сложные цепи, содержащие активные и реактивные элементы, например такие контуры:



В случае нулевых методов измерительный прибор (мостик Уилсона) становится индикатором равновесия, который фиксирует лишь равенство нулю соответствующего сигнала. В этом случае погрешность прибора становится минимальной и равной погрешности нуля.

Достоинством нулевых методов является то, что в ряде случаев полная компенсация измеряемого сигнала (например, тока) может осуществляться не только на входе измерительного прибора, но и во всей измеряемой цепи. Это позволяет дополнительно увеличить точность измерений за счет того, что от объекта измерения не отнимается энергия, необходимая для измерения.

Это легко видеть на примере измерения ЭДС. Если ток через микроамперметр равен нулю, ток через источник ЭДС равен нулю, в этом случае падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника и резисторе R_2 равны нулю и вольтметр измеряет именно ЭДС источника.

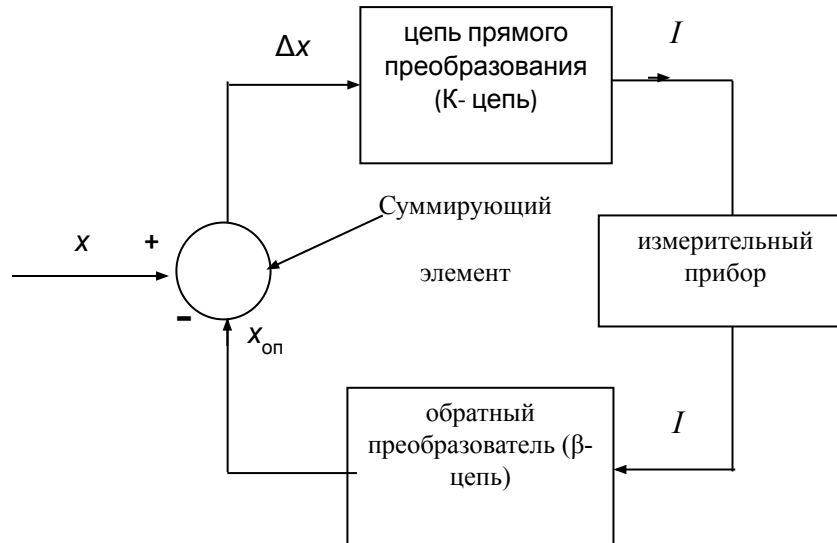
Очень часто именно нулевые методы называют компенсационным методом измерений.

3. Методы уравнивающего преобразования

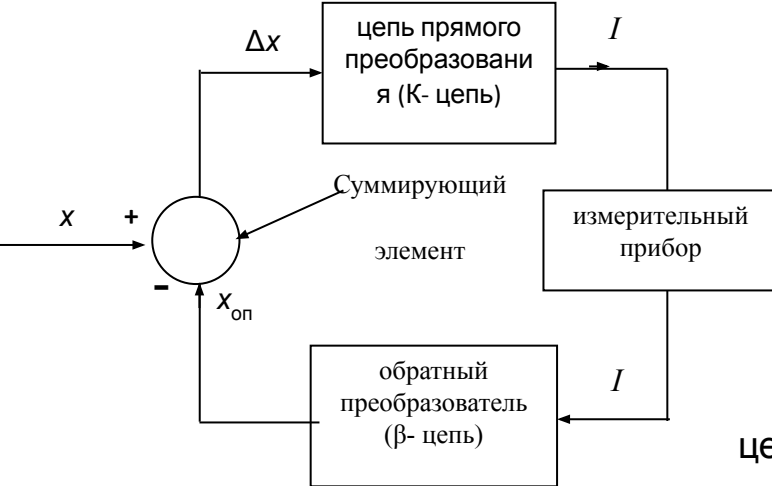
Так же как и разностные методы эти методы позволяют уменьшить сигнал, действующий на измерительный прибор. Отличительной особенностью этого метода является отсутствие отдельного источника опорной физической величины.

3.1. Метод следящей компенсации (автокомпенсации)

Функциональная блок-схема метода:



Отличительной особенностью этого метода является наличие цепи *отрицательной обратной связи*, охватывающей цепь прямого преобразования. Благодаря этому на вход этой цепи поступает не весь измеряемый сигнал, а лишь его разность с опорным сигналом. Однако сам опорный сигнал пропорционален измеряемому сигналу. В результате на вход цепи прямого преобразования поступает малый сигнал, пропорциональный измеряемому сигналу.



Коэффициент преобразования прямой цепи K обычно называют коэффициентом усиления (цепь прямого преобразования – это K -цепь); коэффициент обратного преобразователя обычно обозначают через β (цепь обратного преобразования – это β -цепь).

Из схемы следует: $I = K \cdot \Delta x$, $x_{оп} = \beta \cdot I$, $\Delta x = x - x_{оп}$.
Отсюда найдем: $K_T = \frac{K}{1 + \beta K} X$

Следовательно, коэффициент преобразования всей цепи $S = \frac{K}{1 + \beta K}$

Обычно стремятся обеспечить условие $\beta K \gg 1$. Тогда $S \approx 1/\beta$.

K -цепь обычно содержит множество элементов включенных последовательно: первичный преобразователь, усилитель, модулятор, демодулятор и т.д. При прохождении сигнала, погрешности, вносимые всеми этими элементами, суммируются. Цепь обратного преобразования содержит один-единственный элемент – обратный преобразователь.

Из последней формулы видно, что при больших значения петлевого коэффициента усиления βK коэффициент преобразования всей системы зависит только от коэффициента обратного преобразователя. Очевидно, что гораздо легче изготовить один элемент очень точным, чем изготавливать очень точными множество элементов.

Отличие этого метода от разностного метода: - $x_{оп}$ пропорционально измеряемой величине x ;

- в этом методе невозможно достигнуть условия $\Delta x = 0$ (т. е. невозможно реализовать нулевой метод).

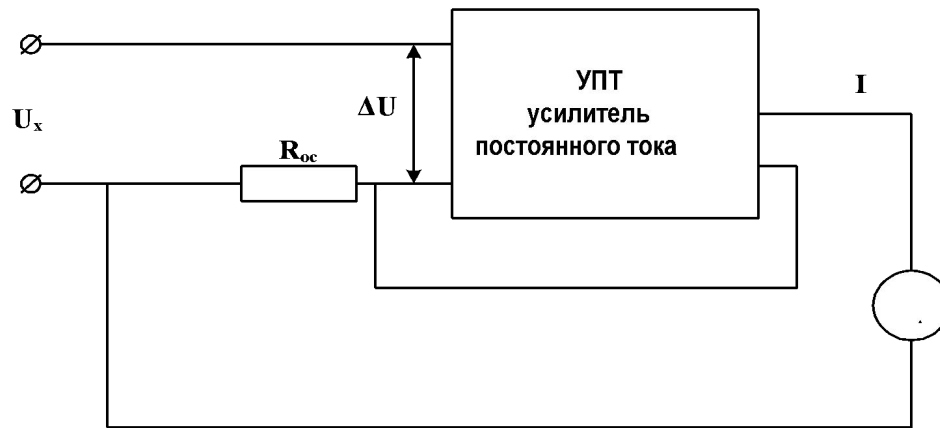
Действительно, нетрудно найти, что $\Delta x = \frac{X}{1 + \beta K}$

.Отсюда следует, что $\Delta x \rightarrow 0$, только если $\beta K \rightarrow \infty$. Однако практически выполнить это условие невозможно.

Эта схема может использоваться для измерения постоянных и переменных сигналов, измерения электрических и неэлектрических величин неэлектрическими методами.

Мера в этой схеме находится в измерительном приборе (измерительная шкала).

Пример. Простейший пример реализации - измерение напряжения:



Сопротивление R_{oc} соответствует коэффициенту обратной связи β . Сопротивление R соответствует коэффициенту усиления прямой цепи K .

В этой схеме обычно $\Delta U \ll U_x$, $\Delta X \ll X$. Здесь $I = R \Delta U$, $\Delta U = U_x - I R_{oc}$. Ток, измеряемый амперметром, пропорционален искомому напряжению:

$$I = \frac{R}{1 + R_{oc} R} U_x$$

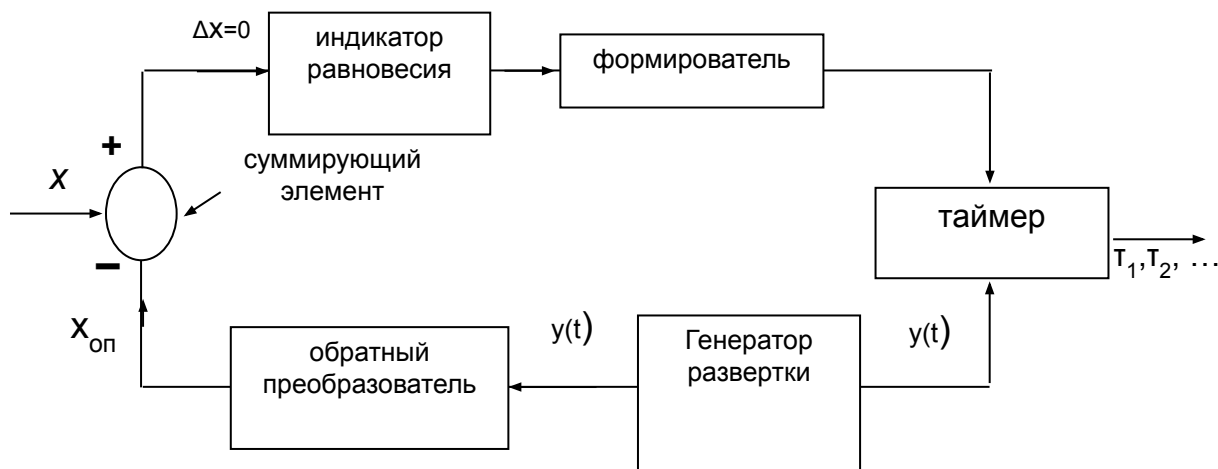
3.2. Метод развёртывающейся компенсации

Основной недостаток метода автокомпенсации (3.1) состоит в том, что при больших значениях величины - βK

система может возбудиться, т.к. сигнал в цепи обратной связи, в силу ряда обстоятельств, может поменять фазу на противоположную.

В этом случае опорный сигнал будет не вычитаться из измеряемого, а складываться с ним. В результате данная схема превращается в генератор переменного тока или напряжения. Вспомните, например, свист динамика, когда напряжение, поданное на усилитель микрофона, слишком велико.

Функциональная блок схема метода развёртывающейся компенсации :

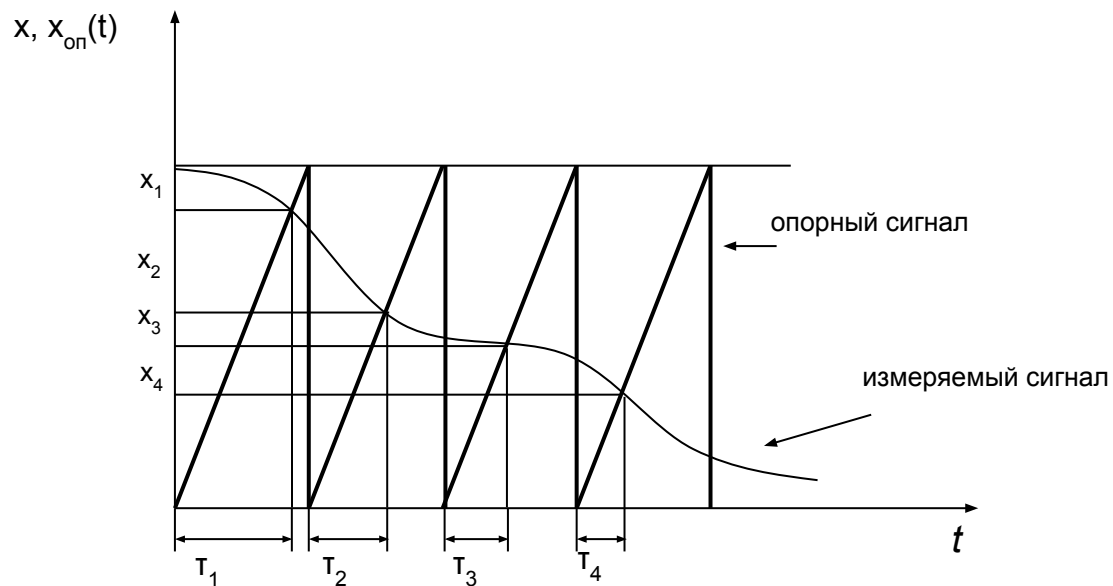


В этом методе генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, которое вычитается из измеряемого сигнала. Разность этих напряжений подается на индикатор равновесия (индикатор нуля).

В момент начала пилообразного сигнала включается электронный секундомер. В момент, когда на индикатор равновесия сигнал отсутствует, вырабатывается сигнал, который останавливает секундомер. Время τ , измеренное секундомером, пропорционально измеряемому сигналу.

Схема осуществляет преобразование значений изменяемой величины x_i в интервал времени τ_i . В современной технике интервалы времени изменяются наиболее точно.

В этой схеме есть следящее уравнивание, но нет обратной связи, и реализуется нулевой метод.



Измерение как процесс

- Измерение любой физической величины включает в себя следующие процедуры:
- выделение измеряемой физической величины из многих других, в том числе и одноимённых, присущих объекту измерения и окружающим телам;
- преобразование измеряемой физической величины в другую, связанную с первой однозначно;
- сравнение измеряемой физической величины с мерой.
- Для каждой из этих процедур разработаны и разрабатываются соответствующие методы и средства.
- Объект измерения, средство измерения, окружающая среда и наблюдатель образуют единую физическую систему, между элементами которой имеют место взаимодействия и обмен энергией.

