



Некоммерческое
акционерное
общество

АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ

Кафедра Электроники и
робототехники

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Конспект лекции
для студентов специальности
5В070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение

Алматы
АУЭС
2018

СОСТАВИТЕЛИ: Б.О. Ускембаева, Э.С. Туртаева. Метрология, стандартизация и сертификация. Конспект лекций для студентов специальности – 5В070400 – Вычислительная техника и программное обеспечение. – Алматы: АУЭС, 2018. – 50 с.

Конспект лекции предназначен для ознакомления предметом Метрология, стандартизация и сертификация.

Рассмотрены основные понятия и методология измерения объектов и систем. Приведены примеры нахождения погрешности и анализа результатов измерений.

Конспект лекций предназначен для студентов, обучающихся по специальности 5В070400 – Вычислительная техника и программное обеспечение.

Ил. 24, табл. 4, библиогр. – 9 назв.

Рецензент: к.ф-м.н., стр.преп. Мусапирова Г.Д.

Печатается по плану издания Некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2018 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2018 г.

Введение

На любом производстве, при любых технологических процессах, контроле состояния окружающей среды, учете и расходовании материальных ресурсов и многих других видах деятельности измерения были, есть и будут одними из важнейших условий достижения поставленных целей. Измерения являются связующим звеном, обеспечивающим все многообразие человеческой деятельности. Каждую секунду в стране выполняются сотни миллионов измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения безопасной и безаварийной работы промышленных и энергетических агрегатов, оптимизации протекающих в них процессов. Затраты на обеспечение операций измерений, испытаний и контроля составляют до 20% от общих затрат на производство продукции. Только высокая и гарантированная точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений на всех уровнях управления производством. Теоретическая метрология является научной основой измерений и конструирования измерительной техники. Она занимается изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: приборов и средств измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и др.

Каждые 10-15 лет происходит смена поколений измерительной техники, что связано с повышением требований к точности, достоверности, быстродействию процессов измерения. С каждым годом при измерениях все шире применяются разнообразные электронные компоненты, измерительные преобразователи (датчики), техника измерений становится все более «электронизированной». Тем не менее неизменными, как правило, остаются основные принципы измерений и обработки данных, к которым, к сожалению, отношение иногда достаточно легкомысленное ввиду возможности применения для обработки данных вычислительной техники. Кроме того, многие принципы, положенные в основу метрологической аттестации, могут быть использованы для анализа самых разнообразных процессов и структур. Поэтому в данном учебном пособии главный акцент сделан на изложении общей теории измерений, основных принципов обработки данных, общих принципов построения измерительных систем.

1 Лекция №1. Физические величины и их единицы

Цель лекции: ознакомление с видами единиц измерения физических величин. Изучение назначения эталонов, категорий эталонов единиц измерения.

Содержание лекции: система единиц; основные и дополнительные системы СИ; единицы измерения физических величин; эталоны, виды эталонов СИ.

Единицы измерения большинства физических величин выражаются некоторым количеством независимых друг от друга основных единиц. Система основных и производных единиц называется системой единиц. В соответствии с положениями XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 году была принята Международная система единиц СИ, на ее основе обязательного применения разработан стандарт ГОСТ 8.417-81.

В системе СИ установлены семь (восемь) основных единиц, используя которые, можно измерять все механические, электрические, магнитные, акустические и световые параметры. Основные единицы измерения СИ являются: метр (м) – единица измерения длины; килограмм (кг) – единица измерения массы; секунда (с) – единица измерения времени; ампер (А) – единица измерения силы электрического тока; кельвин (К) – единица измерения температуры; моль (моль) – единица измерения количества веществ и кандела (кд) – единица измерения силы света.

Кроме основных семи единиц, СИ устанавливает дополнительные единицы: радиан (рад) и стерадиан (ср) – для измерения плоского и телесного угла соответственно (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Основные и дополнительные единицы системы СИ

Величина			Единица		
Наименование	Размерность	обозначение	Наим.	Обозначение	
				русское	междунар.
Основные					
Длина	L	L	метр	м	m
Масса	M	m	килогр.	кг	kg

Время	T	t	секунда	с	s
Сила эл. тока	I	I	ампер	А	A
Термодинамич. температура	Q	T	кельвин	К	K
Количество вещества	N	n, v	моль	моль	mol
Сила света	J	J	кандела	кд	cd
Дополнительные					
Плоский угол	–	–	радиан	рад	rad
Телесный угол	–	–	стерад.	ср	sr

Производные единицы СИ это единицы, которые были получены из основных с помощью уравнений между физическими величинами. К примеру, единица скорости образуются с помощью уравнения:

$$V = \frac{S}{t} \text{ (м/с)}, \quad (1.1)$$

где S – расстояние, равное 1 метру (м);
t - время, равное 1 секунде (с).

Отсюда, единица скорости: м/с, единица силы Ньютон: $1\text{Н}=1\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$, единица давления Паскаль: $1\text{Па}=\text{Н}\cdot\text{м}^2$ и т.д. (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Производные единицы системы СИ

Величина	Единица		
	Наименование	Название	Обозначение
Частота	герц	Гц	с^{-2}
Сила, вес	ньютон	Н	$\text{м}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па	$\text{м}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Энергия, работа,	джоуль	Дж	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$
Мощность	ватт	Вт	$\text{м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-3}$

Количество электричества	кулон	Кл	$c \cdot A$
Эл. напряжение, потенциал, ЭДС	вольт	В	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая емкость	фарад	Ф	$m^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot c^4 \cdot A^{-2}$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	кд · ср
Освещенность	люкс	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$

До настоящего времени в быту и технике широко распространены некоторые внесистемные единицы, которые не входят в СИ. При разработке ГОСТ 8.417-81 было решено допустить к применению ряд таких единиц:

- *допускаемые к применению в специальных областях*, например: астрономическая единица измерения длины – парсек или световой год; единица измерения оптической силы – диоптрия; единица измерения энергии в физике – электроновольт;

- *допускаемые наравне с единицами СИ*, например: единица измерения массы – тонна; единица измерения времени – минута, час и др.; единица измерения плоского угла – градус, минута, секунда; единица измерения объема – литр и тд.;

- *временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ*, например: морская миля – в морской навигации; карат – единица измерения массы в ювелирном деле и тд.;

- *изъятые из употребления*, например: единица измерения давления – миллиметр ртутного столба; лошадиная сила – единица измерения мощности.

Вместе с основными и производными единицами также используются *десятичные кратные и дольные единицы*, которые образуются умножением исходных единиц СИ на 10^n , n – целое число.

Кратная единица – эта единица физической величины, в несколько целое число (положительное или отрицательное) раз превышающая системную или внесистемную единицу. К примеру, единица измерения длины километр равна 10^3 м, т.е. кратна метру.

Дольная единица – единица физической величины, значение которой в несколько целое число раз меньше системной или внесистемной единицы измерения. Например, единица измерения длины миллиметр равна 10^{-3} м, т.е. является дольной.

В машиностроении применяются дольные линейные единицы измерения: миллиметр – $1\text{мм}=10^{-3}\text{м}$, микрометр (микрон) – $1\text{мкм}=10^{-6}\text{м}$. Приставки для образования кратных и дольных единиц измерения приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц измерения

Мно- житель	Приставка	Обозначение приставки	Мно- житель	Приставка	Обозначение приставки
10^1	дека	да	10^{-1}	деци	д
10^2	гекто	г	10^{-2}	санци	с
10^3	кило	к	10^{-3}	милли	м
10^6	мега	М	10^{-6}	микро	мк
10^9	гига	Г	10^{-9}	нано	н
10^{12}	тера	Т	10^{-12}	пико	п
10^{15}	пета	П	10^{-15}	фемто	ф
10^{18}	экса	Э	10^{-18}	атто	а

Эталоны единиц измерения физических величин.

Эталон единицы измерения – средство измерения (комплекс СИ), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы измерения величины с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в установленном порядке.

В Казахстане в настоящее время 114 государственных эталонов и 250 вторичных эталонов единиц измерения физических величин. Рассмотрим эталоны основных единиц системы СИ.

Например, *секунда* – промежуток времени, в котором совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих частоте энергетического перехода между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия (133). Данный протатип основан на способности атомов излучать или поглощать энергию во время перехода между энергетическими состояниями; *метр* – длина десятиmillionной части четверти меридиана, проходящего от экватора до Северного полюса и расстояние, которое проходит свет в вакууме за 1/299 792 458 долю секунды. Данное определение метра было законодательно закреплено в декабре 1985 г. после утверждения единых эталонов времени и частоты.

Как мы видим, данные определения довольно сложные и требуют достаточного уровня знаний по физике. Однако они дают представление о естественном происхождении принятых единиц измерения и основаны они на высоких достижениях теоретической и прикладной физики и других его разделов. Это дает возможность представить базовые единицы измерения как достоверные и точные, также объяснимые и понятные в международных пределах.

2 Лекция №2. Основные вопросы измерений и средств измерений

Цель лекции: изучение типов и классификаций измерения, ознакомление с видами погрешностей, знакомство с правилами округления в метрологии.

Содержание лекции: виды и методы измерения, типы погрешностей, правила округлений и записи результатов измерений.

Измерения различают по способу получения информации, по характеру изменений измеряемой величины в процессе измерений, по количеству измерений, по способу выражения результатов измерения.

По способу получения значений физической величины измерения могут быть прямыми, косвенными, совокупными и совместными, каждое из которых проводится абсолютным и относительным методами

Прямые измерения. Измеряемую физическую величину находят непосредственно из опытных данных ($Q = X$) путем сопоставления с шкалой или мерой, градуированной по мере (при измерении длины, температуры, давления, массы и т. д.).

При применении *метода непосредственной оценки* значение физической величины определяют непосредственно по отсчетному устройству прибора (например, измерение давления пружинным манометром, массы – циферблатными весами, напряжение – вольтметром).

При использовании *метода сравнения с мерой* измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (к примеру, измерение массы рычажными весами с уравниванием гирями).

Дифференциальный метод – метод сравнения с мерой, при котором на прибор действует разность известной величины и измеряемой величины, воспроизводимой мерой (измерения, выполняемые при проверке мер длины сравнением с образцовой мерой на компараторе).

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, при котором результирующий эффект воздействия величин на измерительный прибор сравнения доводят до нуля (измерение электрического сопротивления мостовым уравниванием).

Метод совпадения – метод сравнения с мерой, при котором разность между величиной, воспроизводимой мерой и измеряемой величиной, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов (измерение длины с помощью штангенциркуля с нониусом, где наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса).

Метод замещения – метод сравнения с мерой, при котором измеряемую величину замещают уже известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемых гирь на одну и ту же чашку весов).

Совокупные измерения. ФВ определяется по измерениям нескольких одноименных величин, на основании которого составляется система

уравнений, при решении которой и определяет физическую величину.

Пример. Необходимо определить содержание радионуклидов урана, калия-40 и тория по гамма-спектрометрическим измерениям:

$$C_U = a_{00} I_1 + a_{01} I_2 + a_{03} I_3; \quad (2.1)$$

$$C_{Th} = a_{10} I_1 + a_{11} I_2 + a_{13} I_3; \quad (2.2)$$

$$C_K = a_{20} I_1 + a_{21} I_2 + a_{23} I_3, \quad (2.3)$$

где C_U , C_{Th} и C_K – содержание урана, калия и тория в исследуемой среде;

I_1 , I_2 и I_3 – интенсивности гамма-излучения в выбранных характерных областях спектра гамма-излучения;

$a_{m,n}$ – постоянные коэффициенты, которые определяются экспериментально по измерениям при помощи эталонов.

В настоящее время используются несколько методов измерения физической величины одновременно.

Погрешность измерений – разность между истинной (действительной) величиной и результатом измерения:

$$\Delta = |Q - x|. \quad (2.4)$$

Типы погрешностей

Случайные погрешности – погрешности, вызываемые незакономерными факторами. Они полностью подчиняются энтропическим законам и обрабатываются методами математической вероятностной статистики.

Определение истинных значений физической величины и случайных погрешностей возможно только при проведении ряда измерений при неизменных условиях.

Систематические погрешности – погрешности, вызываемые влиянием регулярных факторов в процессе измерения.

Примеры. Измерение ЭДС батареи, измерение времени разными часами, параллакс при счете стрелочного прибора, измерение длины различными мерами, к примеру, портняжным метром. Чтобы выявить систематические погрешности, необходимо при проведении измерений изменить определенный параметр или изменить условия измерений.

Пример. Измерение напряжения в интервале от 0 до 50 В через 10 В (10, 20, 30, 40, 50) выдал серию следующих ошибок: 0,47; 0,53; 0,6; 0,8; 0,86. Отложили по оси x значения напряжения U , а по оси y – значения погрешности Δ в вольтах (рисунок 2.2).

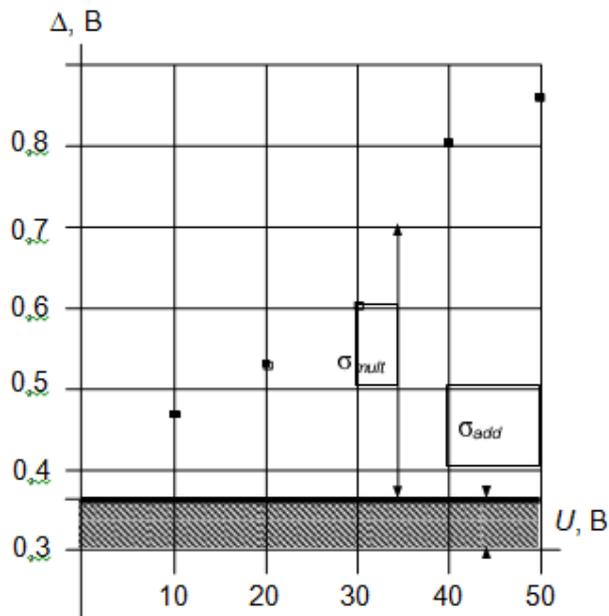


Рисунок 2.2 - Графическое представление случайной и систематической составляющих погрешности

Расположение полученных точек можно аппроксимировать прямой линией, его уравнением будет: $\Delta = 0,337 + 0,0105U$. Из этого следует, что при любых значениях напряжения величина погрешности не может показывать менее 0,336 В. Такая погрешность, которая постоянно суммируется, называется *аддитивной* и выявляется случайно при измерении. Иными словами, это *случайная составляющая* всей погрешности измерений. Вторая составляющая общей погрешности ($0,0106U$) увеличивается по мере возрастания напряжения и называется *мультипликативной*. Она вызывается систематическими процессами и является систематической составляющей всей погрешности измерений. На рисунке 2.2 дано графическое представление случайной и систематической составляющих погрешности:

$$\Delta = 0,337(B);$$

$$\sigma_{add} = 0,333(B); \quad (2.5)$$

$$\sigma_{mult} = 0,0105U(B).$$

Абсолютные аддитивные погрешности не зависят от измеряемой величины X , а мультипликативные прямо пропорциональны значению X . Источники аддитивной погрешности – трение в опорах, неточность отсчета, шум, люфт, трение и вибрации. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, измеренные измерительным прибором. Причины мультипликативной погрешности является влияние внешних факторов и

старение элементов и узлов приборов (к примеру, усталость металла бронзовых пружин, которые обеспечивают противодействующий момент в электромеханических измерительных приборах).

Случайные и систематические погрешности в процессе измерений выявляются одновременно. Общая погрешность равняется сумме погрешностей:

$$\Delta = \Delta_{\text{сл}} + \Delta_{\text{сист}}. \quad (2.6)$$

Правила округления и записи результатов измерений. В прекладной метрологии выработаны следующие правила округления результатов измерения и погрешностей измерений:

В выражении погрешности результата измерения удерживается не более двух значащих цифр, также последняя цифра обычно округляется до нуля или пяти. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, и если первая из них равна 1 или 2, и одной – если первая цифра от 3 до 9.

Примеры. $245,753 \pm 0,16$ округляется до $245,75 \pm 0,15$, но не до $245,7 \pm 0,16$. Результат 5,07800, погрешность 0,002; результат округляют до 5,070.

При вычислениях целесообразно, чтобы используемые числа содержали на одну значащую цифру больше, чем будет в окончательном результате измерения. Это позволяет уменьшить погрешность от округления.

Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов (первая из отбрасываемых цифр, считая слева направо) меньше пяти, то остающиеся цифры не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

Примеры. $452,749 \pm 0,3$ округляется до $452,7 \pm 0,3$; 182437 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 182400.

Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна пяти и за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю цифру увеличивают на единицу.

Примеры. $67,278 \pm 0,5$ округляется до $67,3 \pm 0,5$; $67,253 \pm 0,5$ округляется до $67,3 \pm 0,5$; при сохранении трех значащих цифр число 21567 округляют до 21600, число 215,67 – до 216.

Если отбрасываемая цифра равна пяти и следующие за ней цифры неизвестны или равняются нулю, то последнюю цифру не изменяют, если она четная, если она нечетная увеличивают на единицу.

Примеры. Число 322,5 при сохранении двух значащих цифр округляют до 322, а число 323,5 – до 324.

Округление следует выполнять в конце расчетов, поэтапное округление может привести к ошибкам.

Примеры. Поэтапное округление результата измерения $220,46 \pm 4$ дает на первом этапе $320,5 \pm 4$ и на втором этапе 321 ± 4 , в то время как правильный результат округления 320 ± 4 .

Округление производят лишь в конце, в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с менее трех лишними знаками.

3 Лекция №3. Погрешности косвенных измерений

Цель лекции: ввод в понятие косвенные измерения. Изучение способа определения косвенных измерений.

Содержание лекции: погрешности косвенных измерений; проядок нахождения погрешности косвенных измерений.

Входной величиной измерительного прибора является его измеряемая величина. Наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины, для которых нормированы погрешности, называются пределами измерения. Область значений, заключенная между верхним и нижним пределами измерения, называется *диапазоном измерений*. От диапазона измерений следует отличать *диапазон показаний*, который охватывает область значений шкалы, ограниченную конечным и начальным значениями шкалы.

Таким образом, диапазон измерений, охватывающий часть шкалы, в пределах которой измерения могут быть проведены с нормируемой погрешностью, более узок, чем диапазон показаний, охватывающий всю шкалу.

Если при измерении значение величины находится на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемых прямыми измерениями, то такие измерения называются косвенными измерениями. При косвенных измерениях значение измеряемой величины q находят, ссылаясь на математические зависимости, связывающие эту величину с одной или несколькими величинами (x, y, \dots, w) , измеряемыми прямыми методами:

$$q = f(x, y, \dots, w). \quad (3.1)$$

Погрешность результата искомой величины q также будет связана с погрешностями измеряемых величин x, y, \dots, w .

Значения x, y, \dots, w находят путем прямых измерений, и их погрешности определяются чаще всего пределами допускаемых погрешностей используемых средств измерений. Систематические погрешности полагают исключенным путем введения поправок. Иногда погрешности измерений аргументов бывают заданы не границами, а характеристиками следующих составляющих: СКО случайной погрешности и их доверительными границами неисключенной систематической погрешности. В зависимости от используемых методов и средств измерений, также от условий, где производятся измерения величин x, y, \dots, w , значения их погрешностей могут

быть независимы или коррелированы (связаны) между собой. В практике поверки средств измерений электрических величин случаи, когда погрешности используемых образцовых СИ сильно коррелированы, встречаются достаточно часто, например, при применении одного и того же нормального элемента для настройки нескольких образцовых СИ, колебаниях напряжения общей цепи питания и т.д. При этом коэффициент корреляции, по правилам, остается неизвестным. В таких случаях приходится ссылаться на наихудший случай, полагая коэффициент корреляции равным 1.

Для нахождения погрешности результата косвенного измерения используются следующие правила:

Если в конце результат измерения выражается суммой или разностью двух или более измеренных значений:

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w), \quad (3.2)$$

погрешности $\Delta x, \dots, \Delta w$ независимы и случайны, то абсолютная погрешность результата может быть найдена по следующей формуле:

$$\Delta q = \sqrt{z u w}. \quad (3.3)$$

Если погрешности аргументов коррелированы, значение Δq превышает полученное по приведенной выше формуле, но всегда удовлетворяет следующее условие:

$$\Delta q^{TM} \Delta x + \dots + \Delta z + \Delta u + \dots \Delta w. \quad (3.4)$$

Если в конце результат измерения выражается произведением или частным двух или более измеренных значений:

$$q = \frac{x \cdot \dots \cdot z}{u \cdot \dots \cdot w} \quad (3.5)$$

погрешности $\Delta x, \dots, \Delta w$ независимы и случайны, то относительная погрешность результата может быть найдена по следующей формуле:

$$\sqrt{(\delta x)^2 + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}. \quad (3.6)$$

Когда погрешности аргументов сильно коррелированы, значение Δq может превышать окончательное значение по приведенной формуле, но всегда удовлетворяет следующее условие:

$$\delta q^{TM} \delta x + \dots + \delta z + \delta u + \dots \delta w. \quad (3.7)$$

Если в конце результат измерения будет функцией одной величины:
 $q = f(x)$, то погрешность результата будет:

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \delta x. \quad (3.8)$$

Погрешность функции нескольких величин:

$$q = f(x, y, \dots, w), \quad (3.9)$$

погрешности которые независимы и случайны, находятся по формуле:

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \delta y \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial w} \delta w \right)^2}. \quad (3.10)$$

В любом случае погрешность никогда не превышает значения:

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \delta x + \left| \frac{dq}{dy} \right| \delta y + \dots + \left| \frac{dq}{dw} \right| \delta w. \quad (3.11)$$

Пример. При поверке ваттметра на постоянном токе истинное значение мощности измеряют косвенно при помощи потенциометра. При этом отдельно измеряют ток в последовательной цепи с помощью шунта, а напряжение параллельной цепи с помощью делителя напряжения.

Погрешность измерения напряжения складывается из погрешности потенциометра и погрешности нормального элемента. Пределы допускаемых погрешностей для данных элементов составляют: $\delta_{\text{П.ПТ}} = 0,005 \%$; $\delta_{\text{Н.Э.}} = 0,005\%$; $\delta_{\text{ДЕЛ}} = 0,005\%$; $\delta_{\text{Ш}} = 0,01\%$. Относительная погрешность измерения мощности будет складываться из удвоенной погрешности потенциометра постоянного тока (ППТ) и нормального элемента, погрешностей делителя и меры сопротивления (шунта):

$$\begin{aligned} \delta P &= \sqrt{(2\delta_{\text{П.ПТ}})^2 + (2\delta_{\text{Н.Э.}})^2 + \delta_{\text{ДЕЛ}}^2 + \delta_{\text{Ш}}^2} = \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,005)^2 + (2 \cdot 0,005)^2 + 0,005^2 + 0,001^2} = 0,018\%. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Наличие корреляции между погрешностями отдельных аргументов может привести не только к увеличению, но и к уменьшению погрешности окончательного результата по сравнению с рассчитанной по приведенным формулам значения. Это необходимо учитывать при выборе метода измерения.

4 Лекция №4. Оценка результата измерения

Цель лекции: изучение способов нахождения оценок результата. Знакомство с законами распределения.

Содержание лекции: систематическая оценка процесса измерения; Законы распределения и виды законов распределения.

Задача состоит в том, чтобы по полученным экспериментальным путем результатам наблюдений, содержащим случайные погрешности, найти оценку истинного значения измеряемой величины – результат измерения. Будем полагать, что систематические погрешности в результатах наблюдений отсутствуют или исключены.

К оценкам, получаемым по статистическим данным, предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка называется состоятельной, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины. Оценка называется несмещенной, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемой величины. В том случае, когда можно найти несколько несмещенных оценок, лучшей из них считается та, которая имеет наименьшую дисперсию. Чем меньше дисперсия оценки, тем более эффективной считают эту оценку.

Способы нахождения оценок результата зависят от вида функции распределения и от имеющихся соглашений по этому вопросу, регламентируемых в рамках законодательной метрологии. Общие соображения по выбору оценок заключаются в следующем.

Распределения погрешностей результатов наблюдений, как правило, являются симметричными относительно центра распределения, поэтому истинное значение измеряемой величины может быть определено как координата центра рассеивания $x_{ц}$, т. е. центра симметрии распределения случайной погрешности (при условии, что систематическая погрешность исключена). Отсюда следует принятое в метрологии правило оценивания случайной погрешности в виде интервала, симметричного относительно результата измерения ($x_{ц} \pm \Delta x$). Координата $x_{ц}$ может быть найдена несколькими способами. Наиболее общим является определение центра симметрии на основе принципа симметрии вероятностей, т. е. нахождение такой точки на оси x , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайных погрешностей равны между собой и составляют $P_1 = P_2 = 0,5$. Такое значение $x_{ц}$ называется *медианой*.

Координата $x_{ц}$ может быть определена и как центр тяжести распределения, т. е. как математическое ожидание случайной величины.

При асимметричной кривой плотности распределения вероятностей оценкой центра распределения может служить абсцисса моды распределения, т. е. координата максимума плотности. Однако есть распределения, у которых не

существует моды (например, равномерное); и распределения, у которых не существует математического ожидания.

В практике измерений встречаются различные формы кривой закона распределения, однако, чаще всего имеют дело с нормальным и равномерным распределением плотности вероятностей.

С учетом многовариантности подходов к выбору оценок и в целях обеспечения единства измерений правила обработки результатов наблюдений обычно регламентируются нормативно-техническими документами (стандартами, методическими указаниями, инструкциями). Так, в стандарте на методы обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями указывается, что приведенные в нем методы обработки установлены для результатов наблюдений, принадлежащих нормальному распределению.

Нормальное распределение (распределение Гаусса). Нормальное распределение плотности вероятности характеризуется тем, что, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение имеет сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями (рисунок 4.1). Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим. Практически суммарное воздействие даже сравнительно небольшого числа возмущений приводит к закону распределения результатов и погрешностей измерений, близкому к нормальному.

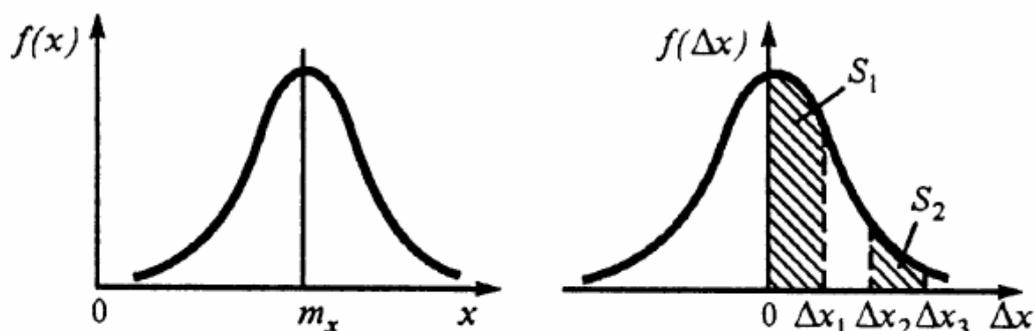


Рисунок 4.1 - Кривые нормального распределения

Случайная величина называется *распределенной нормально*, если она имеет плотность вероятности следующего вида:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4.1)$$

где x – случайная величина;

m_x – математическое ожидание случайной величины;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Эта формула выражает в аналитической форме нормальный закон распределения. Функция представляет собой колоколообразную кривую. Параметр m_x – это точка максимума, через которую проходит ось симметрии, параметр Δx – расстояние от этой точки до точки перегиба.

Перенеся начало координат в центр распределения m_x и откладывая по оси абсцисс погрешность $\Delta x = x - m_x$, получим кривую нормального распределения погрешностей:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (4.2)$$

Для группы из n наблюдений, распределенных по нормальному закону,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}. \quad (4.3)$$

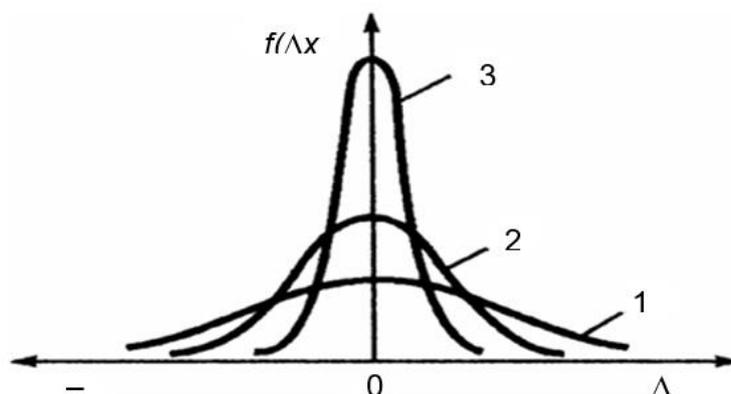
Обратим внимание на несколько свойств нормального распределения погрешностей.

Кривая нормального распределения погрешностей симметрична относительно оси ординат. Это означает, что погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, имеют одинаковую плотность вероятностей (при большом числе наблюдений встречаются одинаково часто), т. е. кривая должна быть симметрична относительно оси ординат (аксиома случайности). Математическое ожидание случайной погрешности равно нулю.

Из характера кривой следует, что при нормальном законе распределения малые погрешности будут встречаться чаще, чем большие (аксиома распределения). Так, вероятность появления погрешностей, укладывающихся в интервал от 0 до Δx_1 , которая характеризуется площадью S_1 , будет значительно больше, чем вероятность появления погрешностей в интервале от $\sqrt{\Delta x_2}$ до $\sqrt{x_{33}}$ (площадь S_2) (рисунок 4.1).

На рисунке 4.2 изображены кривые нормального распределения с различными средними квадратическими отклонениями, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Сравнивая кривые между собой, можно убедиться, что, чем меньше СКО, тем меньше рассеяние результатов наблюдений и тем выше вероятность того, что

большинство случайных погрешностей в них будет мало. Естественно заключить, что качество измерений тем выше, чем меньше СКО случайных погрешностей.



1 – σ_1 ; 2 – σ_2 ; 3 – σ_3 .

Рисунок 4.2 - Рассеяние результатов наблюдений:

На рисунке 4.3 показано нормальное распределение при $m_x = 0$ и различных σ .

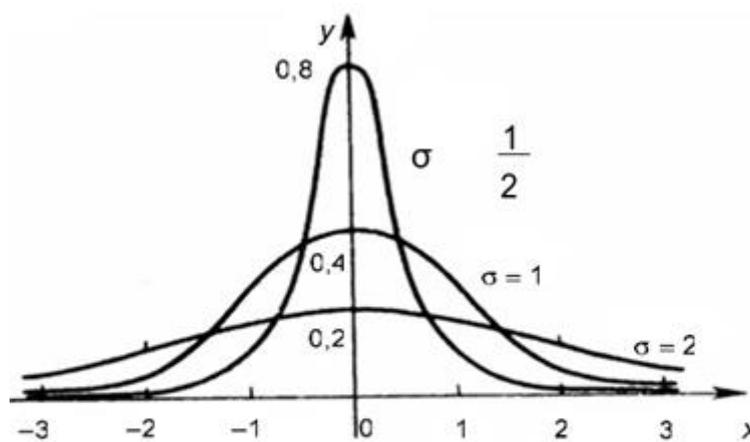


Рисунок 4.3 - Нормальное распределение при различных σ

Если значение x мало, то кривая высокая и заостренная; если значение x велико, она широкая и плоская.

Равномерное распределение. Если случайная величина x принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала от x_1 до x_2 с постоянной плотностью вероятностей (рисунок 4.4), то такое распределение называется *равномерным* и описывается соотношениями

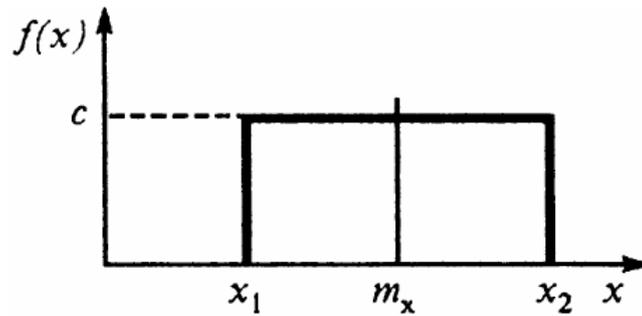


Рисунок 4.4 - Равномерное распределение случайной величины

Так как площадь, ограниченная кривой распределения, равна единице,

$$\sqrt{c(x_2 - x_1)} = 1. \quad (4.4)$$

5 Лекция № 5. Прямые измерения с многократными наблюдениями

Цель лекции: изучение правил обработки результатов измерения, последовательность обработки.

Содержание лекции: среднее квадратическое отклонение; распределения Стьюдента; обработка результатов измерения с многократными наблюдениями.

Рассмотрим группу из n независимых результатов наблюдений случайной величины x , подчиняющейся нормальному распределению. Оценка рассеяния единичных результатов наблюдений в группе σ относительно среднего их значения m_x вычисляется по формуле (5.1).

Поскольку число наблюдений в группе, на основании которых вычислено среднее арифметическое m_x , ограничено, то, повторив заново серию наблюдений этой же величины, мы получили бы новое значение среднего арифметического. Повторяя многократно серии наблюдений и вычисляя каждый раз их среднее арифметическое значение, принимаемое за результат измерения, мы убедимся в рассеянии средних арифметических значений.

СКО – это *мера достоверности найденной оценки* (среднего арифметического).

Теория показывает, что если рассеяние результатов наблюдений в группе подчиняется нормальному закону, то и их среднее арифметическое тоже подчиняется нормальному закону распределения при достаточно большом числе наблюдений ($n > 50$). Отсюда следует, что при одинаковой доверительной вероятности доверительный интервал среднего

арифметического в результате наблюдений.

Теоретически при $n \rightarrow \infty$ случайную погрешность результата измерения можно было бы свести к нулю. Однако это невозможно, и стремиться беспредельно уменьшать случайную погрешность результата измерения не имеет смысла, так как рано или поздно определяющим становится не рассеяние среднего арифметического, а недостоверность поправок на систематическую погрешность (неисключенная систематическая погрешность).

При нормальном законе распределения плотности вероятностей результатов наблюдений и небольшом числе наблюдений среднее арифметическое подчиняется закону *распределения Стьюдента* с тем же средним арифметическим значением m_x . Особенностью этого распределения является то, что доверительный интервал с уменьшением числа наблюдений расширяется по сравнению с нормальным законом распределения при той же доверительной вероятности. Для оценки доверительных границ случайной погрешности это отражается введением коэффициента t_q вместо t . Коэффициент t_q распределения Стьюдента зависит от числа наблюдений и выбранной доверительной вероятности и находится по таблицам, пример которых приведен ниже.

Таблица 5.1 - Значение коэффициента t_q для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента с $n-1$ степенями свободы

$n-1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$	$n-1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$
3	3,182	5,841	16	2,120	2,921
4	2,776	4,604	18	2,101	2,878
5	2,571	4,032	20	2,086	2,845
6	2,447	3,707	22	2,074	2,819
7	2,365	3,499	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	26	2,056	2,779
9	2,262	3,250	28	2,048	2,763
10	2,228	3,169	30	2,043	2,750
12	2,179	3,055	∞	1,960	2,576
14	2,145	2,977			

Так, при числе наблюдений $n = 14$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ коэффициент студента будет $t_q = 2,16$.

Обработка результатов измерения с многократными наблюдениями. Правила обработки результатов измерения с многократными наблюдениями учитывают следующие факторы:

- обрабатывается ограниченная группа из n наблюдений;
- результаты наблюдений x_i могут содержать систематическую погрешность;
- в группе наблюдений могут встречаться грубые погрешности;
- распределение случайных погрешностей может отличаться от

нормального.

Последовательность обработки результатов наблюдений

Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений (введением поправки).

Вычислить оценку среднего квадратического отклонения результатов наблюдений:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - X)^2}{n-1}} . \quad (5.1)$$

Вычислив оценку СКО результатов наблюдений, целесообразно проверить наличие в группе наблюдений грубых погрешностей, помня, что при нормальном законе распределения ни одна случайная погрешность $x_i - X$ с вероятностью, практически равной единице, не может выйти за пределы $\pm 3\sigma$. Наблюдения, содержащие грубые погрешности, исключают из группы и повторяют вычисления X и σ .

Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению.

Приближенно о характере распределения можно судить, построив гистограмму. Строгие методы проверки гипотез с использованием специальных критериев (χ^2 – Пирсона, ω^2 – Мизеса-Смирнова и др.) рассматриваются в специальных дисциплинах.

При числе наблюдений $n < 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы случайной погрешности результата определяют лишь в том случае, если достоверно известно, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону.

Вычислить доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения при заданной вероятности P :

$$\varepsilon = t_q S_{\bar{x}} , \quad (5.2)$$

где t_q – коэффициент Стьюдента.

Вычислить границы суммарной неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерений.

Неисключенная систематическая погрешность результата образуется из неисключенных систематических погрешностей метода, средств измерений, погрешностей поправок и др.

При суммировании эти составляющие рассматриваются как случайные величины. При отсутствии данных о виде распределения неисключенных составляющих систематических погрешностей их распределения принимают за равномерные. При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей границы неисключенной систематической погрешности результата измерения θ вычисляют по формуле:

$$\theta = K \sqrt{\sum_{i=0}^m \theta_i^2}, \quad (5.3)$$

где θ_i – граница i -й неисключенной составляющей систематической погрешности;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при $P = 0,95$ $k = 1,1$);

m – количество неисключенных составляющих.

Доверительную вероятность при вычислении границ НСП принимают такую же, как при вычислении границ случайной погрешности результата измерения. Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Анализ соотношения между неисключенной систематической погрешностью и случайной погрешностью показывает, что если

$$\frac{\theta}{S_x} < 0,8$$

то неисключенной систематической погрешностью можно пренебречь, и принять границы погрешности результата Δ равными $\pm \theta$.

Если оба неравенства не выполняются, вычисляют СКО результата как сумму неисключенной систематической погрешности и случайной составляющей. Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле:

$$\Delta = \pm K S_{\Sigma}. \quad (5.4)$$

Коэффициент K определяют по эмпирической формуле:

$$K = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}. \quad (5.5)$$

Стандартом регламентирована и форма записи результатов измерений. При симметричном доверительном интервале погрешности результат измерения представляют в форме $X \pm \Delta, P$, где X – результат измерения. При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результатов или при необходимости дальнейшей их обработки результат измерения представляют в форме X, S_x, n, θ .

6 Лекция №6. Техника и методика электрических измерений

Цель лекции: ознакомление с типами средств измерения. Знакомство с

видами погрешности измерительных приборов и преобразователей.

Содержание лекции: погрешности и характеристики средств измерения; классификация погрешности СИ; класс точности.

Измерительные приборы – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. По способу сравнения значения измеряемой величины со значением величины, принятым за единицу, различают приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. По виду выдаваемой информации приборы делятся на аналоговые и цифровые.

Погрешности средств измерений. С точки зрения методики измерений все многообразие погрешностей возможно классифицировать следующим образом:

- *инструментальные погрешности* - собственные погрешности СИ;
- *методические погрешности* – погрешности методики измерений, связанные, как правило, с неправильным использованием измерительной техники.

Рассмотрим подробнее *инструментальные погрешности*.

Абсолютная погрешность (вариация показаний) – разность между действительным (истинным) значением измеряемой величины и измеренным значением (показанием прибора):

$$\Delta = (x_0 - x_i). \quad (6.1)$$

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к действительному (истинному) значению или к текущему измерению:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_i} \text{ (доли или \%)}. \quad (6.2)$$

Если измерение выполнено однократно, то значение относительной погрешности уменьшается с ростом x_i (предполагается независимость Δ от x_i). Поэтому для измерений целесообразно выбирать тот прибор, показания которого были бы в последней части его шкалы (диапазона измерений), а для сравнения различных приборов использовать понятие приведенной погрешности.

Приведенная погрешность – отношение абсолютной погрешности в пределах измерительной шкалы СИ к некоторому нормирующему значению СИ (или измеряемой величины):

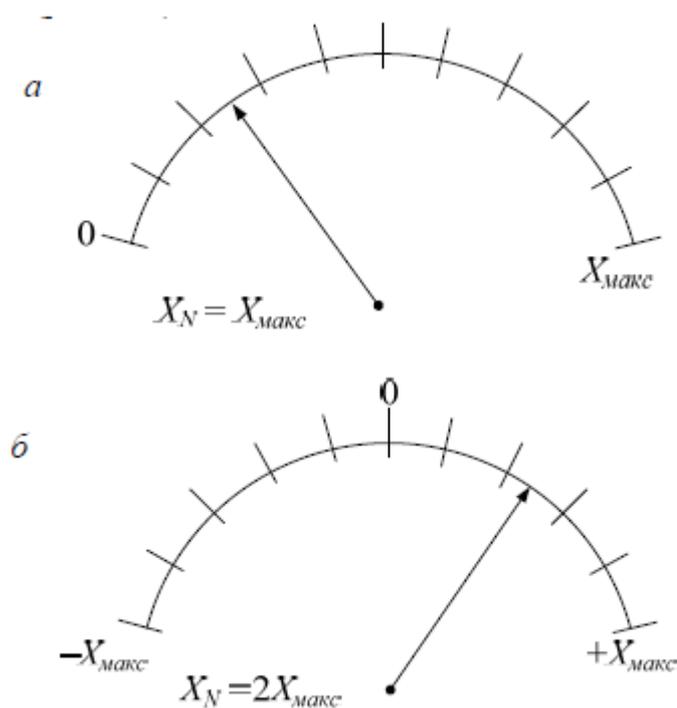
$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \text{ (доли или \%)}, \quad (6.3)$$

где Δ – абсолютная погрешность (вариация показаний) в пределах

полной шкалы измерений;

X_N – нормирующее значение измеряемой величины или параметра (разность между верхним и нижним значениями шкалы прибора или конечное значение шкалы прибора). X_N выражается в тех же единицах, что и абсолютная погрешность Δ .

Для приборов с равномерной шкалой X_N равно верхнему пределу измерения (рисунок 6.1).



a - шкала равномерная, нуль на краю шкалы ($X_N = X_{\max}$); *б* - шкала равномерная, нуль посередине шкалы ($X_N = 2X_{\max}$).

Рисунок 6.1 - Выбор нормирующего значения для равномерных шкал:

При использовании приборов с неравномерной шкалой следует учитывать одну особенность, отмеченную на рисунке 6.1. За нормирующее значение параметра принимается измерительная часть шкалы, которая подвергается обязательной процедуре поверки. Начальная часть шкалы, в пределах которой поверка не производится (на рисунке 6.2 от 0 до X_A), называется *индикаторной*, т. е. прибор показывает наличие измеряемого параметра, но определить его величину невозможно. Измерительная часть шкалы у таких приборов обычно обозначается двумя жирными точками (показывающими интервал от X_A до X_B).

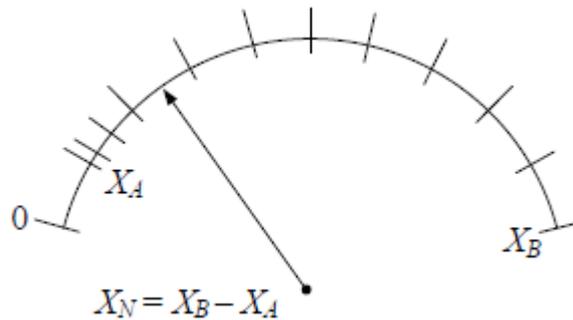


Рисунок 6.2 - Выбор нормирующего значения для приборов с неравномерной шкалой и нулем в начале шкалы

Для СИ с установленным номинальным значением параметра это значение и принимается за нормирующую величину. Например, измеритель отклонения промышленной частоты от 50 Гц имеет $X_N = 50$ Гц.

В общем виде (см. п. 2.2.1) $\Delta = a + bX$, и тогда для относительной погрешности можно записать:

$$\delta = b + a / X. \quad (6.4)$$

Для нормирования погрешностей СИ с аддитивной и мультипликативной составляющими наибольшее распространение получила формула нормирования предела относительной погрешности вида:

$$\delta_{\text{доп}} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_N}{x_i} - 1 \right) \right], \quad (6.5)$$

где $\delta_{\text{доп}}$ – предел допускаемой относительной погрешности, %;

X_N – конечное значение диапазона измерений или диапазона значений величины на выходе меры;

c и d – постоянные числа.

Данную формулу применяют тогда, когда абсолютная погрешность монотонно увеличивается от начала к концу диапазона.

Класс точности СИ в этом случае представлен двумя цифрами: c и d (в процентах), разделенными косой чертой (c / d), которые выбирают из нормированного ряда (ГОСТ 8.401-80): 6,0; 4,0; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01 и т. д. В настоящее время такое обозначение класса точности широко применяется при нормировании погрешности цифровых приборов, многозначных мер сопротивлений и др.

Пример. Прибор класса 0,1/0,05 имеет погрешность $\delta_{\text{доп}} = 0,1 + 0,05 (X_N / x_i - 1)$, %. Каков же физический смысл коэффициентов c и d ? Легко подсчитать, что минимальная погрешность измерения (0,1 %) будет при максимальном значении параметра $x_i = X_N$. В этом случае выражение в круглых скобках

обращается в нуль и $\delta_{\text{доп}} = \pm c$. Таким образом, c – предел допускаемой относительной погрешности при максимальном значении прибора (меры). Видно, что при $x_i = X_N / 2$ погрешность увеличится уже до 0,15 %.

Для уяснения смысла коэффициента d преобразуем приведенное выше выражение для $\delta_{\text{доп}}$ так, чтобы получить выражение для определения предела допускаемой абсолютной погрешности:

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm \frac{1}{100} [d \cdot X_N + (c - d)X_i]. \quad (6.6)$$

Пусть прибор показывает нуль. Тогда второе слагаемое в квадратных скобках равно нулю. Отсюда видно, что d – предел допускаемой погрешности при нулевом показании прибора (меры), выраженный в процентах от верхнего предела измерений.

Аддитивная и мультипликативная составляющие СИ связаны с числами c и d следующими соотношениями: $b = c - d$ (характеризует возрастание абсолютной погрешности при увеличении показаний прибора):

$$a = d \cdot X_N. \quad (6.7)$$

Класс точности – обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей.

Основная приведенная погрешность не должна превышать значения класса точности СИ. Классы точности присваиваются типам средств измерений с учетом результатов государственных приемочных испытаний. Средствам измерений с несколькими диапазонами измерений одной и той же физической величины или предназначенным для измерений разных физических величин могут быть присвоены различные классы точности для каждого диапазона или каждой измеряемой величины. Так, амперметр с диапазонами 0—10, 0—20 и 0—50 А может иметь разные классы точности для отдельных диапазонов; электроизмерительному прибору, предназначенному для измерений напряжения и сопротивления, могут быть присвоены два класса точности: один — как вольтметру, другой — как омметру.

Классы точности СИ, выраженные через абсолютные погрешности, могут быть обозначены в виде заглавных букв латинского алфавита (например, М, С и т. д.) или римских цифр (I, II, III, IV и т. д.) с добавлением условных знаков. Смысл таких обозначений раскрывается в нормативно-технической документации. При этом, чем дальше буква от начала алфавита, тем больше значения допускаемой абсолютной погрешности.

Обобщим способы выбора обозначения классов точности СИ (на шкале или панели прибора):

Первый способ предусматривает задание класса точности для приборов с преобладающими аддитивными погрешностями (это большинство аналоговых приборов). В этом случае класс точности задается в виде числа K (без

кружочка). При этом нормируется основная приведенная погрешность прибора, выраженная в процентах, которая во всех точках шкалы не должна превышать по модулю число K . Число K выбирается из ряда значений: (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0)·10^{*n*}, где $n = 1, 0, -1, -2$.

Второй способ предусматривает задание класса точности для приборов с преобладающими мультипликативными погрешностями. В этом случае нормируется основная относительная погрешность, выраженная в процентах. Класс точности задается в виде числа K в кружочке. Число K выбирается из приведенного выше ряда.

Третий способ предусматривает задание класса точности для приборов с соизмеримыми аддитивными и мультипликативными погрешностями. Аддитивные погрешности не зависят от измеряемой величины X , а мультипликативные – прямо пропорциональны значению X . Источники аддитивной погрешности – трение в опорах, неточность отсчета, шум, наводки и вибрации. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором. Причина мультипликативных погрешностей – влияние внешних факторов и старение элементов и узлов приборов.

В этом случае класс точности задается числами c и d , разделенными косой чертой (c / d), причем $c > d$. При этом нормируется основная относительная погрешность. Число c отвечает за мультипликативную составляющую погрешности, а число d – за аддитивную. Значения c и d выбираются из вышеприведенного ряда. К приборам, класс точности которых выражается дробью с косой чертой, относятся цифровые приборы, а также мосты и компенсаторы.

Четвертый способ задания класса точности используется для приборов с резко неравномерной шкалой. Класс точности задается числом K , подчеркнутым галочкой.

В этом случае нормируется основная приведенная погрешность в процентах от длины шкалы.

Пример. На шкале амперметра с пределами измерения 0...10 А нанесено обозначение класса точности 2,5. Это означает, что для данного прибора нормирована приведенная погрешность. $X_N = 10$ А; $\gamma = \pm 2,5$ %. Абсолютная погрешность составит:

$$\Delta = \frac{X_N \cdot 2,5\%}{100\%} = \pm 0,25 \text{ А.} \quad (6.8)$$

Пример. Обозначение на шкале прибора заключено в окружность. Это значит, что допускаемая основная погрешность выражена в виде относительной погрешности от измеренного значения и погрешность следует вычислять в процентах от измеренного значения тока. Так, при $x_i = 2$ А абсолютная погрешность прибора не должна превышать:

$$\Delta = \frac{2A \cdot 2.5\%}{100\%} = \pm 0.05A. \quad (6.9)$$

Выбор класса точности прибора должен соответствовать задачам измерения. Необходимо заранее оценить ожидаемую (допустимую) погрешность измерения.

Пример. Электронный потенциометр типа КСП с классом точности 0,5 и шкалой 0...1100° С включен в цепь измерения температуры лабораторной печи. Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta = \frac{0.5(1100)}{100} = \pm 5.5^\circ\text{C}. \quad (6.10)$$

Очевидно, что не имеет смысла измерять температуру по шкале потенциометра с требуемой точностью менее 6° С.

7 Лекция №7. Средства измерений

Цель лекции: ознакомление с видами средств измерений. Знакомство с аналоговыми и цифровыми преобразователями.

Содержание лекции: измерительные средства, классификация, измерительные преобразователи; виды измерительных преобразователей.

Используемые при измерениях технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства и предназначенные для нахождения опытным путем с определенной точностью значения заранее выбранной физической величины, называют средствами измерений (СИ).

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины заданного размера (например, плоскопараллельная концевая мера длины, гиря – мера массы).

На практике используются однозначные и многозначные меры, а также наборы и магазины мер. *Однозначные меры* воспроизводят величины только одного размера (гиря). *Многозначные меры* воспроизводят несколько размеров физической величины. Например, миллиметровая линейка дает возможность выразить длину предмета в сантиметрах и в миллиметрах.

Примером стандартного образца свойств является шкала твердости Мооса, которая представляет собой набор 10 эталонных минералов для определения числа твердости по условной шкале. Каждый последующий минерал этой шкалы является более твердым, чем предыдущий.

Новые стандартные образцы допускаются к использованию при условии прохождения ими метрологической аттестации.

Набор мер представляет собой комплект однородных мер разного размера, что дает возможность применять их в необходимых сочетаниях.

Например, набор лабораторных гирь, набор концевых мер длины.

Магазин мер – сочетание мер, объединенных конструктивно в одно механическое целое, в котором предусмотрена возможность посредством ручных или автоматизированных переключателей, связанных с отсчетным устройством, соединять составляющие магазин меры в нужном сочетании. По такому принципу устроены магазины электрических сопротивлений.

При пользовании мерами следует учитывать номинальное, и действительное значение мер, а также погрешность меры.

Номинальным называют значение меры, указанное на ней. Действительное значение меры должно быть указано в специальном свидетельстве как результат высокоточного измерения с использованием официального эталона. Разность между номинальным и действительным значениями называется *погрешностью меры*.

Измерительные инструменты (штангенциркуль, микрометр) и измерительные приборы (микроскопы, оптиметры, вольтметры, амперметры и т.д.) являются средствами измерений, предназначенными для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Универсальные – предназначенные для измерения одноименных физических величин различных изделий.

Специальные – служащие для измерения отдельных видов изделий (например, размеров резьба или зубчатых колес) или отдельных параметров изделий (например, шероховатости, отклонений формы поверхности). Различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. К приборам прямого действия относятся, например, вольтметры, амперметры, термометры и т.п.

Приборы сравнения предназначаются для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Такие приборы широко используются в научных целях, а также на практике для измерения таких величин, как яркость источников излучения, давление сжатого воздуха и др.

По степени индикации значений измеряемой величины измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие. Показывающий прибор допускает только отсчитывание показаний измеряемой величины (микрометр, вольтметр). В регистрирующем приборе предусмотрена регистрация показаний, например, в форме диаграммы, путем печатания показаний на бумажную или магнитную ленту.

Калибры – устройства (тела), предназначенные для проверки соответствия размеров изделий или их конфигураций установленным допускам (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 - Виды калибров

Измерительные преобразователи (ИП) – средства измерения, служащие для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований. По характеру преобразования различают:

- аналоговые преобразователи (АП);
- цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП);
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

По месту в измерительной цепи различают:

- первичный преобразователь (преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина);
- промежуточный преобразователь (преобразователь, занимающий место в измерительной цепи после первичного ИП).

Измерительные преобразователи либо входят в конструктивную схему измерительного прибора, либо применяются совместно с ним, но сигнал преобразователя не поддается непосредственному восприятию наблюдателем. Например, преобразователь необходим для передачи информации в память компьютера, для усиления напряжения и т.д. Преобразуемую величину называют входной, а результат преобразования – выходной величиной. Соотношение между входной и выходной величинами, называется функцией преобразования.

Конструктивно обособленный первичный ИП, от которого поступают сигналы измерительной информации, является датчиком.

По метрологическому назначению все СИ подразделяются на два вида – рабочие СИ и эталоны.

Рабочие СИ предназначены для проведения технических измерений. Они могут быть *лабораторными*, используемыми при научных исследованиях (требования к ним – повышенная мощность и чувствительность), *производственными*, используемыми для контроля качества продукции,

технологических процессов (требования – повышенная ударно – вибрационная стойкость, температурная стабильность характеристик), *полевыми* – используемыми при эксплуатации самолетов, судов, автомобилей (требования – повышенная стабильность в условиях резкого перепада температур, высокой влажности, вибрационных нагрузок).

8 Лекция №8. Измерение физических величин

Цель лекции: изучение метода измерения тока. Ознакомление с видами измерительных амперметров. Знакомство с работой амперметра.

Содержание лекции: измерение тока; виды измерительных амперметров, структура, принцип работы.

Сила тока непосредственно измеряемая величина. Единица измерения в системе СИ – ампер.

Исторически первыми наиболее широко распространенным до настоящего времени является метод измерения величины постоянного тока путем оценки степени взаимодействия магнитного поля, создаваемого проводником, по которому протекает ток, и магнитного поля с известной индукцией. Этот метод измерения называют прямым.

Косвенный метод измерения тока основан на измерении падения напряжения на образцовом сопротивлении, включаемом в разрыв цепи. Очевидно, что в этом случае свойства цепи несколько изменяются. В целях обеспечения минимального влияния на величину протекающего в цепи тока величина образцового сопротивления должна выбираться малой.

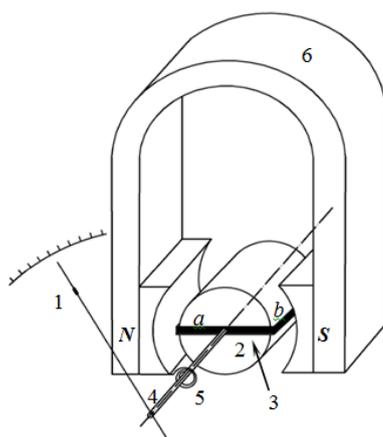


Рисунок 8.1 - Стрелочный амперметр магнитоэлектрического типа

Основа такого прибора – магнитоэлектрический механизм (рисунок 8.1), обеспечивающий изменение угла поворота указательной стрелки (1), соединенной с диамагнитной рамкой (2) при изменении тока в проводнике (3),

намотанном на эту рамку. Через рамку, стороны которой обозначим a и b , проходит ось (4), к которой прикреплена спиральная пружина (5), создающая возвратный момент при повороте рамки (эта пружина также выполняет роль гибкой токоведущей шины). Рамка находится в магнитном поле с индукцией B , создаваемом постоянным магнитом (6). В результате протекания тока I через w витков проводника (3), размещенных на рамке, к каждой ее стороне b оказывается приложена сила Ампера:

$$F_a = bIBw \quad (8.1)$$

и возникает вращающий момент:

$$M = 2F_A \cdot a/2. \quad (8.2)$$

Рамка будет поворачиваться вокруг своей оси до тех пор, пока не выполнится условие:

$$M = \alpha Cs, \quad (8.3)$$

где α – угол поворота рамки относительно начального положения;

Cs – удельный момент противодействия пружины.

Таким образом, угол поворота рамки пропорционален величине протекающего через проводник тока:

$$\alpha = bBwI/Cs. \quad (8.4)$$

При использовании приборов магнитоэлектрического типа следует соблюдать полярность их подключения – протекание значительного тока в обратном направлении может привести к деформации стрелки. Эти приборы также не могут быть использованы для измерений, если ток I меняет свою величину с частотой, большей нескольких десятков Гц – из-за наличия собственного момента инерции рамка может оставаться неподвижной даже, при наличии переменной составляющей тока значительной амплитуды. Пределы измерения таких приборов обычно не превышают 10...30 мА. Для расширения пределов измерений применяют шунт – низкоомное высокоточное сопротивление R_{sh} , включаемое в разрыв цепи, к которому подключается измерительный магнитоэлектрический механизм (рисунок 8.2).

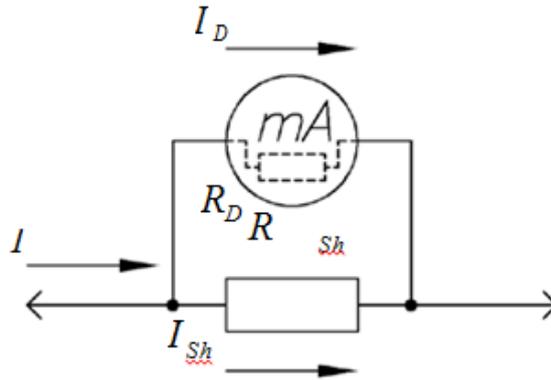


Рисунок 8.2 - Схема включения шунта

В этом случае ток I_D , протекающий через измерительный прибор, оказывается в n раз меньшим, чем измеряемый ток:

$$I \div n = (R_D + \frac{R_{sh}}{R_{sh}}), \quad (8.5)$$

где R_D – внутренне сопротивление прибора, определяемое суммой активных сопротивлений провода, намотанного на рамку магнитоэлектрического механизма прибора, и токоподводящих шин. Поскольку амперметры включаются в разрыв цепи, основное требование к этим приборам – обеспечение минимальной величины внутреннего сопротивления минимизации вносимых погрешностей измерений.

Амперметр с датчиком на основе эффекта Холла. Эффект Холла – явление возникновения разности потенциалов на краях поперечного сечения проводника с протекающим в нем током, наблюдающееся при помещении этого проводника в магнитное поле. Открыт в 1879 г. американским физиком Эдвином Холлом в тонких пластинках золота. Эффект основан на отклонении траектории движения носителей заряда от прямолинейной за счет воздействия на них силы Лоренца: в результате такого движения заряженных частиц у одной боковой грани проводника скапливаются положительно заряженные частицы, а у противоположной грани – отрицательно заряженные и возникает разность потенциалов, которую называют холловским напряжением.

Поскольку протекание тока через проводник сопровождается возникновением магнитного поля ($|B| \sim I$), установив рядом с проводником датчик на основе эффекта Холла (датчик Холла); по величине холловского напряжения U_H можно судить о напряженности магнитного поля и, следовательно, о величине тока в проводнике (I – рисунок 8.3).

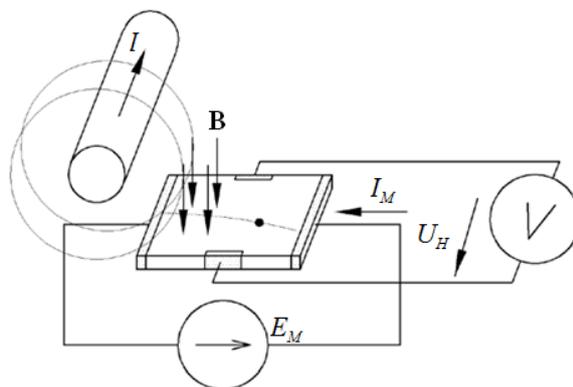
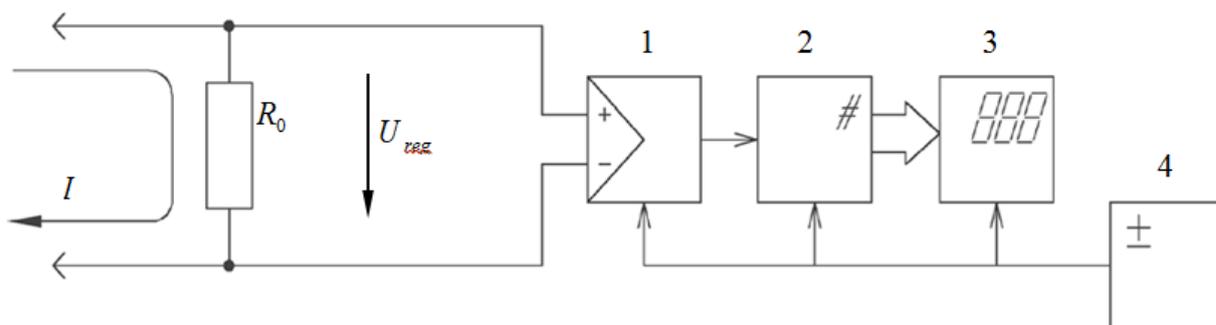


Рисунок 8.3 - Измерение тока I в проводнике с помощью датчика Холла

Важным преимуществом амперметра с датчиком на основе эффекта Холла является малая величина внутреннего сопротивления такого прибора, которое определяется собственным сопротивлением отрезка проводника, по которому протекает ток I .

Цифровой амперметр. Развитие микроэлектроники способствовало широкому распространению измерительных приборов с цифровой индикацией результата измерений. Эти приборы получили название цифровых измерительных приборов. Они, как правило, содержат преобразователь измеряемой величины в аналоговый электрический сигнал, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), обеспечивающий преобразование величины напряжения U_{reg} на его входе в двоичный цифровой код, соответствующий этой величине, и цифро-знаковый дисплей, на котором отображаются результаты измерений. Структурная схема простейшего цифрового амперметра, реализующего косвенный метод измерения тока, представлена на рисунке 8.4.



1 – усилитель напряжения; 2 – АЦП; 3 – цифровой индикатор;
4 – источник питания.

Рисунок 8.4 - Структурная схема цифрового амперметра

Если температура резистора R_0 неизменна, то $U_{reg} = IR_0$. Если резистор R_0 нагревается от температуры T_0 до некоторой температуры T :

$$U_{reg} = I(R_0 + R_{\alpha T}(T - T_0)), \quad (8.6)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления [K^{-1}], определяемый материалом, из которого изготовлен резистор.

Очевидно, что во втором случае возникнет дополнительная погрешность оценки величины тока, протекающего через резистор.

Прибор такого типа нуждается в применении внешнего дополнительного источника электрической энергии – батареи, аккумулятора или электросети.

9 Лекция №9. Влияние входа прибора на показания и градуировку шкал. Вольтметры. Ваттметры

Цель лекции: изучение метода измерения напряжения, мощности и сопротивления. Ознакомление с видами электрических приборов.

Содержание лекции: измерение напряжения, мощности и сопротивления; виды электрических приборов, структура, принцип работы.

Электростатический вольтметр. Прибор, позволяющий измерить разность потенциалов, характеристики которого с точки зрения отсутствия влияния на измеряемую цепь близки к идеальным – электростатический вольтметр.

Этот прибор содержит смонтированные в диэлектрическом корпусе электроды – подвижный и неподвижный. Один электрод подключается к точке А цепи, другой – к точке В (рисунок 9.1).

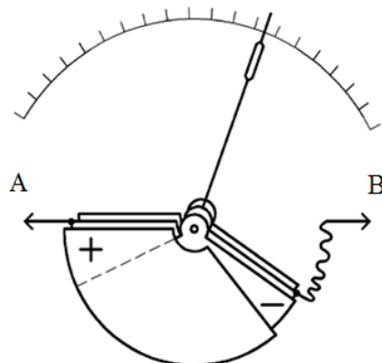


Рисунок 9.1 - Электростатический стрелочный вольтметр

В результате накопления на одном электроде положительных зарядов, а на другом – отрицательных, взаимодействие между которыми описывается законом Кулона, наблюдается перемещение подвижного электрода до достижения условия равновесия – равенства нулю моментов всех действующих на него сил. Положение механически соединенной с подвижным электродом стрелки прибора позволяет определить разность потенциалов U_{AB} .

Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа. Принцип действия такого прибора основан на использовании закона Ома. К точкам электрической цепи, разность потенциалов между которыми должна быть измерена, подключаются последовательно соединенные образцовое сопротивление R_a (которое обычно называют добавочным) и магнитоэлектрический измеритель тока (рисунок 9.2). Величина тока I_D в цепи определяется выражением:

$$I_D = \frac{U_{AB}}{R_a + R_{D1}}, \quad (9.1)$$

где R_D , как и ранее, сопротивление обмоточного провода рамки и токоведущих шин магнитоэлектрического механизма. Поскольку угол отклонения его стрелки пропорционален величине тока I_D , а $R_D \ll R_a$, можно считать, что $I_D = \frac{U_{AB}}{R_a}$, т.е. угол отклонения стрелки будет пропорционален измеряемому напряжению. Величину R_a определяют из условия обеспечения отклонения стрелки до последнего деления шкалы при измерении величины U_{AB} , взятой из стандартного ряда значений (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 100 В).

Отметим, что прибор такого типа всегда влияет на режим работы основной цепи, к которой он подключается. Для уменьшения степени его влияния величина R_a должна быть на несколько порядков больше эквивалентного сопротивления R_{AB} участка основной цепи. Как правило, это условие уверенно выполняется, если ток I_{Dmax} , обеспечивающий отклонение стрелки прибора до последнего деления шкалы I_{Dmax} , составляет несколько десятков мкА. Величину $S = 1/x$ [кОм/В] называют чувствительностью прибора. Она определяет величину добавочного сопротивления R_a на каждый вольт измеряемого напряжения U_{AB} . Чувствительность серийно выпускаемых вольтметров часто составляет 20 кОм/В.

Цифровой вольтметр. Входной аттенюатор такого прибора (рисунок 9.4) обеспечивает высокоточное масштабирование напряжения, подаваемого на его вход. Сигнал с выхода аттенюатора поступает на вход АЦП, а измеренная величина напряжения индицируется на цифровом индикаторе. Во многих цифровых вольтметрах реализуется функция индикации соответствия полярности измеряемого напряжения полярности измерительных входов – в случае, если такого соответствия не наблюдается, на цифровом индикаторе

перед результатом измерений отображается знак «—».

Измерение мощности в цепях постоянного тока. Активная мощность, которая выделяется на участке цепи постоянного тока, может быть оценена в результате измерения количества тепла, выделяемого этим участком цепи. Прямые колориметрические измерения оказываются длительными и трудоемкими, поэтому для измерения мощности используют ее зависимость от величин тока и напряжения (рисунок 9.2).

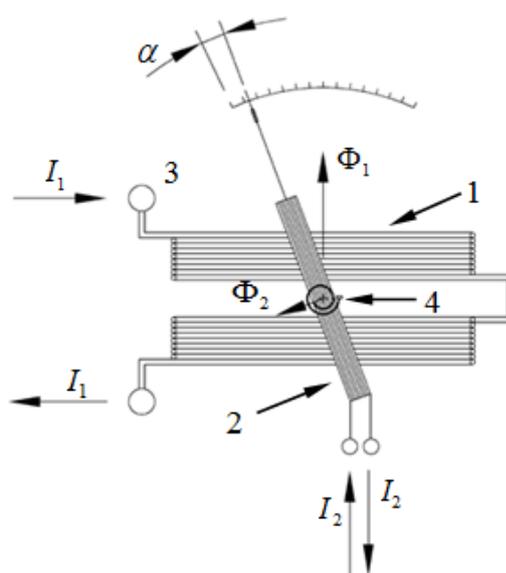


Рисунок 9.2 - Электродинамический стрелочный прибор

Используя эту формулу, можно рассчитать мощность, выделяющуюся на участке цепи при протекании через него постоянного тока, предварительно измерив величину тока амперметром и с помощью вольтметра определив падение напряжения на этом участке цепи.

Электродинамический стрелочный ваттметр. В цепях постоянного тока для измерения мощности широко применяются электродинамические стрелочные приборы. Прибор (рисунок 9.5) содержит две катушки – неподвижную (1), выполненную из медного обмоточного провода большого сечения с общим числом витков w_1 , сопротивление которой можно считать пренебрежимо малым, и подвижную (2) из w_2 витков тонкого провода с сопротивлением r . Подвижная катушка выполняется в виде прямоугольной рамки со сторонами a и b и к ней прикрепляется стрелка прибора (3). При протекании тока I_1 через неподвижную катушку в ней создается магнитный поток Φ , пронизывающий витки подвижной катушки. Если через подвижную катушку будет протекать ток I_2 , то к каждой стороне b рамки будет приложена сила ампера (1.1); возникнет вращающий момент (1.2), и рамка повернется на угол, определяемый рассмотренным ранее условием равенства моментов сил:

$$\alpha C_s = M_\Phi, \quad (9.2)$$

где C_s - удельный момент противодействия пружины (4).

M_Φ момент, создаваемый в результате взаимодействия магнитного потока Φ и рамки с током:

$$M_\Phi = \frac{dW}{d\alpha}, \quad (9.3)$$

где W - электромагнитная энергия двух контуров - катушек стоками I_1 и I_2 , имеющих собственные индуктивности L_1, L_2 и взаимную индуктивность $M_{1,2} \div LI^2$.

Поскольку собственные индуктивности катушек не зависят от их взаимного положения, как показано на рисунке 9.3.

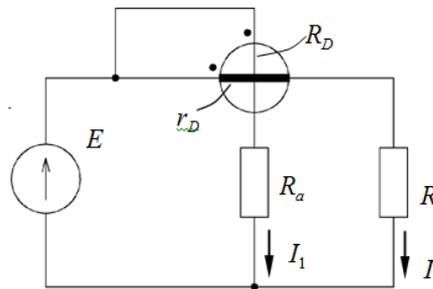


Рисунок 9.3 - Схема подключения электродинамического измерителя для измерения мощности

Отметим, что множитель $dM_{1,2}/d\alpha$ определяется формой катушек и их взаимным положением. Для того чтобы шкала прибора была линейной, стремятся обеспечить выполнение условия $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = const$. Необходимо учитывать важную особенность применения приборов такого типа: они могут работать как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

Включив электродинамический измеритель в цепь постоянного тока так, как это показано на рисунке 9.3, можно обеспечить измерение мощности P , выделяющейся на сопротивлении нагрузки R при протекании через него тока I . Точками на схеме отмечены начальные выводы обмоток катушек - подвижной, имеющей сопротивление R_D , и неподвижной, имеющей сопротивление $rd \cong 0$. Такое соединение катушек обеспечивает отклонение стрелки измерителя в правильном направлении. Поскольку

$$I_1 = E/(R_D + R_a), \quad (9.4)$$

то

$$\alpha = \frac{1}{C_s(R_D + R_a)} EI \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = kP,$$

где k – коэффициент пропорциональности;

R_a – добавочное сопротивление.

Измерение активного сопротивления. Для определения величины активного сопротивления используют два основных метода: метод измерения величины тока и метод компарирования.

Типы сигналов и их параметры. Тип сигнала в цепи (гармонический, импульсный, сигнал сложной формы) в общем случае определяется путем визуализации зависимости $u(t)$ в течение интервала времени, заведомо превышающего период колебаний. Полученная осциллограмма (от oscillation graphice (лат.) – рисование колебания) позволяет определить тип сигнала.

Магнитоэлектрические стрелочные амперметры. Появление в середине 20 века полупроводниковых диодов обеспечило массовое применение магнитоэлектрических приборов для измерения действующего значения тока. На рисунке 9.4 представлены две схемы включения магнитоэлектрического прибора в цепь переменного тока – однополупериодная (а) и двухполупериодная (б). Для первой схемы средний момент отклонения подвижной части измерительного прибора в с, равен M , рассчитываемый, где T – период сигнала, меряемого тока (ток через прибор PA1 и диод VD1 протекает только в течении половины периода гармонического сигнала $i(t) = I_m(\sin\omega t)$).

Электродинамический стрелочный вольтметр. Основой вольтметра является электродинамический измеритель, обмотки которого включены последовательно на рисунке 9.4.

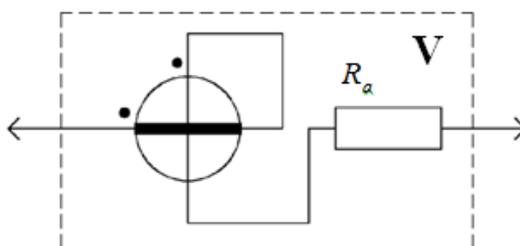


Рисунок 9.4 - Электродинамический стрелочный вольтметр

Угол поворота α стрелки вольтметра определяется выражением:

$$\alpha = K_E(U/R)^2,$$

где R_a – добавочное сопротивление, которое велико по сравнению с реактивным сопротивлением обмоток электродинамического измерителя;

U – действующее значение напряжения. Таким образом, так же, как и в цепях постоянного тока, принцип измерения величины действующего

напряжения основан на применении закона Ома.

Магнитоэлектрический стрелочный вольтметр. Основой таких вольтметров является магнитоэлектрический стрелочный измерительный прибор, подключаемый к выходу двух полупериодного выпрямителя (рисунок 9.5).

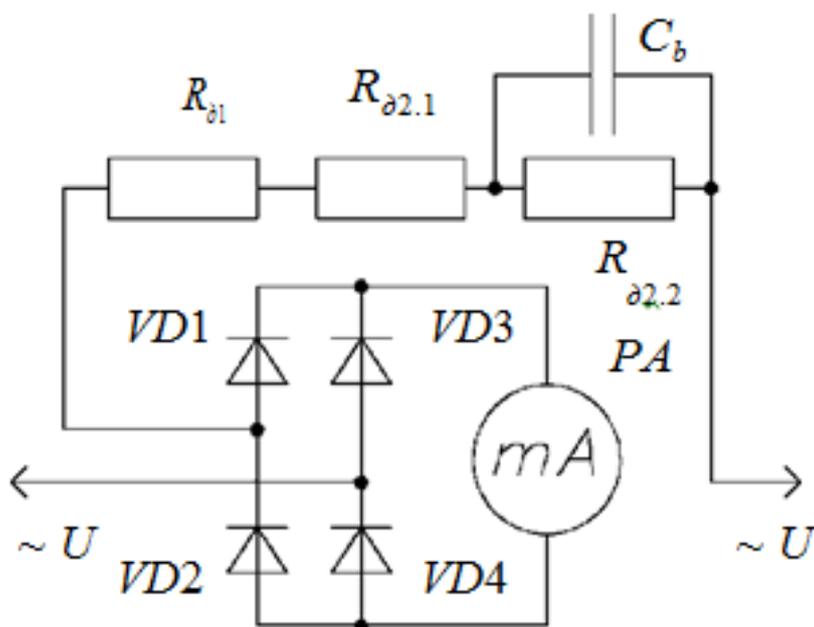


Рисунок 9.5 - Магнитоэлектрический стрелочный вольтметр с термо- и частотной компенсацией

Поскольку эквивалентное сопротивление выпрямителя уменьшается на 0,1...1,0 % при повышении температуры окружающей среды на 10 °С, предпринимаются специальные меры для компенсации этой зависимости с целью сохранения точности измерений прибора в рабочем диапазоне температур. Это явление оказывает наибольшее влияние на результаты измерений малых напряжений, поскольку в этом случае величина добавочного сопротивления, как правило, соизмерима с эквивалентным сопротивлением выпрямителя. Для минимизации температурной зависимости результатов измерений часто используют последовательное соединение сопротивления $R_{\partial 2}$, выполненного из манганина (сплава на основе 85 % меди, 11,5...13,5 % марганца и никеля), характеризующегося малым изменением электрического сопротивления при комнатных температурах, и сопротивления $R_{\partial 1}$, выполненного из меди, удельное сопротивление которой возрастает с увеличением температуры.

10 Лекция №10. Осциллографический метод измерения параметров сигналов

Цель лекции: изучение метода измерения осциллографом. Изучение измерения разности фаз. Знакомство с мостовым методом измерения.

Содержание лекции: осциллографический метод; измерение разности фаз сигналов различными методами измерения;

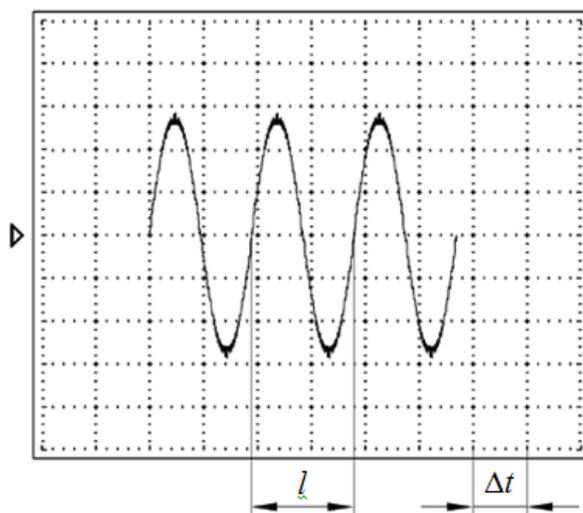


Рисунок 10.1 - Оценка периода колебаний по наблюдаемой осциллограмме

По зарегистрированной осциллограмме сигнала определяют период колебаний T (или период следования импульсов в случае импульсного сигнала), после чего рассчитывают частоту колебаний $f = 1/T$. Величину T находят путем измерения расстояния между точками пересечения горизонтальной прямой с однотипными участками осциллограммы периодического сигнала, в пределах которых производная $du(t)/dt$ максимальна. Поскольку это расстояние пропорционально искомой величине T , значение периода определяется из выражения:

$$T = \Delta t \cdot l, \quad (10.1)$$

где Δt – параметр осциллограммы [с/дел] (при $\Delta t = 5$ мкс/дел и $l = 1,85$ дел $T = 9,3$ мкс).

Выполнение условия $du(t)/dt \rightarrow \max$ обусловлено стремлением обеспечить минимальную погрешность измерений. Так, например, определение периода гармонических колебаний при регистрации сигнала, представляющего собой аддитивную смесь гармонического сигнала и шума вида

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi) + n(t), \quad (10.2)$$

где $n(t)$ – шумовая реализация, в зависимости от конкретных параметров $n(t)$ закона распределения, величины дисперсии – может привести к значительной погрешности измерения периода T , если в качестве опорных точек использовать локальные экстремумы сигнала $u(t)$.

Главное достоинство рассматриваемого метода – визуальный контроль реализации $u(t)$, исключающий ошибки измерения частоты, связанные с неправильной оценкой формы сигнала.

Измерение разности фаз сигналов. Осциллографический метод измерения разности фаз. Оценку разности фаз $\Delta\varphi$ между двумя сигналами

$u_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ и $u_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$, которая имеет вид $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, можно получить, используя метод наблюдения сигналов с помощью осциллографа.

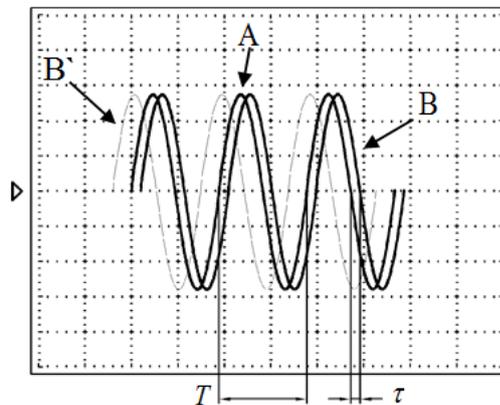


Рисунок 10.2 - Осциллографический метод измерения разности фаз

Поскольку величины φ_1 и φ_2 определены только для моделей сигналов, разность фаз $\Delta\varphi$, являющуюся величиной относительной, находят, приняв один из наблюдаемых сигналов; например, A – за опорный.

Так как полный период колебания составляет величину 2π , то:

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{\tau}{T}\right), \quad (10.3)$$

где T – величина временного интервала, соответствующая периоду колебаний,

τ – интервал времени между отсчетами сигналов A (опорного) и B (измеряемого).

Каждый из этих двух отсчетов характеризуется одинаковыми значениями аргументов гармонических функций сигналов A и B. Если осциллограмма сигнала B находится правее осциллограммы сигнала A – это

значит, что аргумент гармонической функции сигнала В достигает такого же значения, что и аргумент сигнала А, позже.

Измерение разности фаз фазометром. Принцип работы прибора основан на преобразовании фазового сдвига в напряжение (или ток) и последующем измерении этого напряжения (тока) с помощью стрелочного или цифрового измерителя. На выходах компараторов входных сигналов формируются последовательности прямоугольных им пульсов, которые поступают на вход разностного формирователя.

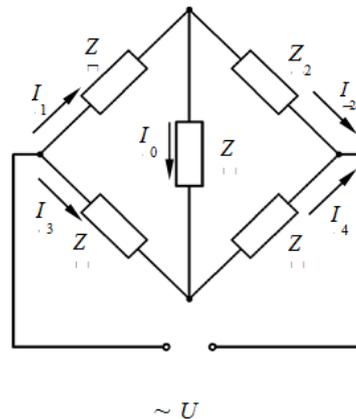


Рисунок 10.3 - Одинарный мост комплексное сопротивление

Измерения комплексного сопротивления (иногда называемого импедансом) участка цепи обычно выполняют с использованием так называемых мостовых схем. Схема одинарного моста изображена на рисунке 10.3. Участки цепи, называемые плечами моста, содержат в общем случае комплексные сопротивления $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$. В диагональ моста включается нагрузка – комплексное сопротивление \dot{Z}_0 или так называемый нуль-индикатор – измеритель тока стрелочного типа с центральным положением стрелки, которая может отклоняться влево или вправо в зависимости от направления протекающего через прибор тока. Равновесие моста (такое состояние, когда $\dot{I}_0 = 0$) достигается при выполнении равенства, откуда выводится важное соотношение для фазовых характеристик сопротивлений:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3, \quad (10.4)$$

а также два равенства для мнимых и действительных компонент этих сопротивлений:

$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_1 \\ R_1 X_4 + X_1 R_4 = R_2 X_3 + X_2 R_3. \end{cases} \quad (10.5)$$

Наличие двух уравнений равновесия (10.5) означает необходимость

регулирования не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Из этих уравнений для фазовых характеристик сопротивлений следует важный вывод о том, что если смежные плечи моста содержат активные сопротивления (например, $\varphi_4 = \varphi_3 = 0$), то оба сопротивления 1 и могут иметь или индуктивный, или емкостной характер. Если противоположные плечи содержат активные сопротивления (например, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$), то одно из сопротивлений – Z_1 или Z_4 должно быть емкостным, а другое – индуктивным.

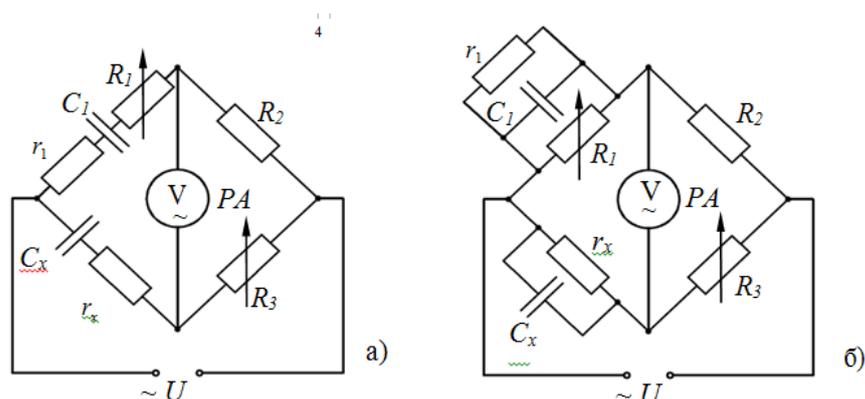


Рисунок 10.4 - Мосты для измерения емкости методом сравнения с мерой

На рисунке 10.4 представлены принципиальные схемы мостов для измерения емкости методом сравнения с мерой: C_1 – образцовая емкость с внутренним сопротивлением r_1 ; C_x – измеряемая емкость с внутренним сопротивлением r_x . Если тангенс диэлектрических потерь имеет малое значение, применяют схему 10.4, а. В зависимости от свойств реактивного элемента (индуктивности или емкости), параметры которого должны быть измерены, используют различные схемы мостов, обеспечивающие необходимую точность измерений.

11 Лекция №11. Основные приемы работы с измерительными приборами

Цель лекции: изучение метода измерения с приборами стрелочного типа. Знакомства с базовыми погрешностями средств измерения.

Содержание лекции: снятие показаний с приборов стрелочного типа; особенности проведения осциллографических измерений; основные источники погрешностей; оценка конечных результатов измерений.

Подключение приборов, за редким исключением (в случае применения

токовых клещей, например), производят в обесточенной цепи. Тем самым обеспечивается режим электробезопасности измерений и гарантируется защита элементов цепи от выхода из строя при случайном коротком замыкании.

Измерители сопротивления должны подключаться только к обесточенным цепям. В противном случае либо измерения будут ошибочными, либо измерительный прибор выйдет из строя.

Снятие показаний с приборов стрелочного типа. Шкалой прибора называется поверхность, на которую нанесены отметки, по которым и определяются показания прибора. Оконечная часть стрелки, перемещающаяся в пределах шкалы, выполняется ножевидной с целью обеспечения точного снятия показаний. При определении показаний прибора необходимо выбрать такую точку наблюдения, при которой боковые поверхности ножевидной части стрелки не будут видны. Затем, проецируя наблюдаемую кромку стрелки на шкалу, необходимо определить индицируемое значение измеряемой величины. Достижимая погрешность оценки – $\frac{1}{4}$ деления. Приборы высшего класса точности снабжаются зеркальной шкалой, в которой отражается стрелка. Отсчет производится при таком положении глаза, при котором стрелка закрывает свое изображение в зеркале.

Из-за наличия нелинейных искажений в развертке электронно-лучевой трубки во всех осциллографах такого типа измерения проводятся в центральной части экрана, вертикальный и горизонтальный размеры которой составляют не более 80% от соответствующего размера экрана осциллографа. Такие ограничения не действуют при работе с цифровыми осциллографами – измерения можно проводить в пределах всего экрана.

Современные осциллографы часто снабжаются переключателем величины входного сопротивления (для обеспечения наиболее точного воспроизведения широкополосных сигналов обычно используют входы, сопротивление которых составляет 50 Ом). Перед подключением осциллографа, во избежание повреждения как его входных цепей, так и исследуемой цепи, следует убедиться, что входное сопротивление выбрано верно.

Большинство осциллографов имеют переключатель, блокирующий прохождение постоянной составляющей исследуемого сигнала на вход усилителя вертикального отклонения (режим «Закрытый вход» или «AC» – Alternating Current). В этом режиме измерения потенциалов исследуемого сигнала невозможны.

Используя режим «Открытый вход» или «DC» – Direct Current, по величине смещения осциллограммы от положения изображения горизонтальной линии, наблюдаемом при отключенном источнике сигнала, можно судить о наличии постоянной составляющей во входном сигнале и определить его полярность.

Как мы знаем, погрешность измерений – обобщенное понятие, означающее отличие измеренной величины от ее истинного значения.

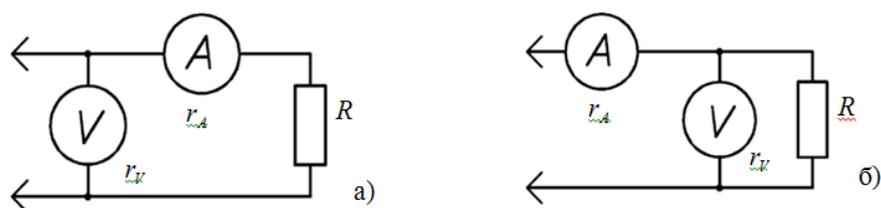


Рисунок 11.1 - Схемы включения амперметра и вольтметра

Погрешность абсолютная выражается разностью между измеренным значением величины \hat{X} и ее истинным значением X : $\Delta X = \hat{X} - X$. Она выражается в единицах измеряемой величины (например, при измерении напряжения – [В]). Отсутствие знака погрешности означает, что истинное значение находится в пределах измеренного значения \hat{X} .

Погрешность относительная – отношение абсолютной погрешности к истинному значению: $\delta X = \Delta X / X$. Поскольку истинное значение при проведении измерений остается неизвестным, при расчетах вместо X используют измеренное значение \hat{X} и считают, что $\delta X \approx \Delta X / \hat{X}$. В большинстве случаев относительную погрешность выражают в процентах.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. Ее причиной может быть не учитываемое взаимное влияние объекта измерений – электрической цепи – и измерительных приборов. Так, на рисунке 11.1 представлены две схемы включения амперметра и вольтметра в цепь постоянного тока. Включение приборов по схеме рисунка 11.1, а обеспечивает наиболее точное измерение величины тока I_R , протекающего через резистор R , а включение по схеме рисунка 11.1, б – наиболее точное измерение падения напряжения V_R на этом резисторе. Вместе с тем, в первом случае вольтметр измерит сумму падений напряжения на резисторе R и внутреннем сопротивлении амперметра r_A , а во втором случае амперметр измерит величину суммы токов, протекающих через резистор R и внутреннее сопротивление вольтметра r_V . Вычисленные на основании совместных показаний приборов оценки сопротивления R будут различны и будут отличаться от его истинного значения методические погрешности измерений δR . Схема, приведенная на рисунке 11.1, а, обеспечит меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений R , а схема, приведенная на рисунке 11.1, б – при измерении малых сопротивлений. В остальных случаях следует поочередно использовать обе схемы для обеспечения точного измерения величин U_R и I_R .

Погрешность квантования имеет место в средствах измерения или методах, использующих эту процедуру – цифровых измерительных приборах, аппроксимационных методах измерений и т.п.

Погрешность средства измерения (иногда ее называют

инструментальной) – составляющая погрешности измерений, обусловленная несовершенством средства измерений (прибора).

Погрешность наблюдения – погрешность, возникающая при наблюдении положения стрелки стрелочного прибора, визуального определения параметров осциллограммы и т.п. Зависит, прежде всего, от квалификации оператора. Её составляющие – погрешность считывания, погрешность интерполяции (неточное определение дробной части деления шкалы) и др.

В результате обработки серии измеренных значений различают следующие три вида погрешностей.

Погрешность грубая (промах) – погрешность измерений, значительно превосходящая по значению ожидаемую при данных условиях измерений. Основным источником таких погрешностей – ошибки оператора или дефекты измерительного прибора. Наличие этих погрешностей выявляется при обработке результатов измерений (рисунок 11.2, а), после чего эти результаты исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Погрешность систематическая обусловлена несовершенством средства измерений и метода измерений (рисунок 11.2, б).

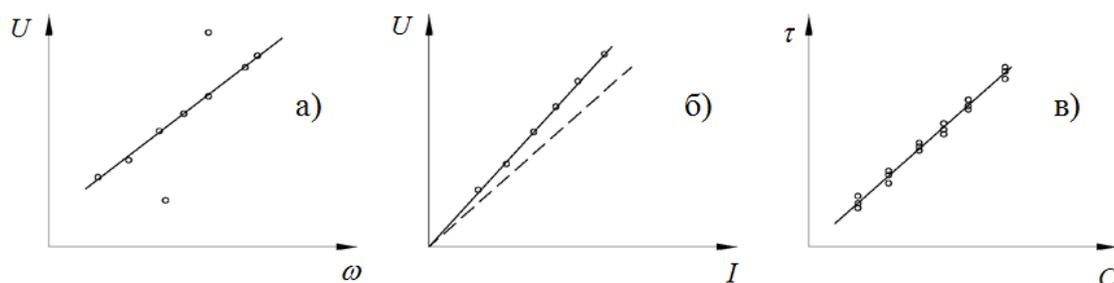


Рисунок 11.2 - Различные погрешности результатов измерений

Погрешность случайная – причиной возникновения этой погрешности являются непредвиденные изменения параметров исследуемой цепи, средства измерений, окружающей среды (рисунок 11.2, в).

Таким образом, измеряя напряжение на выводах источника постоянного напряжения с номинальным значением $5,00 \pm 0,01$ В различными вольтметрами 1-го класса точности, можно получить результаты измерений в диапазоне значений $4,9 \dots 5,1$ В и сделать ошибочный вывод о стабильности выходного напряжения источника. Вот почему класс точности применяемого прибора (таблица 11.1) должен соответствовать требованиям решаемой задачи.

Основная приведенная погрешность не должна превышать значения класса точности СИ. Средствам измерений с несколькими диапазонами измерений одной и той же физической величины или предназначенным для измерений разных физических величин могут быть присвоены различные классы точности для каждого диапазона или каждой измеряемой величины.

Таблица 11.1 - Значения классов точности приборов (ГОСТ 8.401-80)

Тип прибора	Классы точности
Образцовые и точные	0,05; 0,1; 0,2; 0,5
Рабочие	1; 1,5; 2; 2,5; 5

Класс точности прибора выражает количественная оценка гарантированных границ основной погрешности. Он численно равен погрешности, определенной в процентах от конечного значения диапазона измерений в нормальных условиях эксплуатации, указываемых в паспорте прибора (см. Погрешность относительная). Так, вольтметр 1-го класса точности, предназначенный для измерения напряжения в диапазоне значений от 0 до 10 В, обеспечивает погрешность измерений $\pm 0,01 \cdot 10 = \pm 0,1$ В. С другой стороны, вольтметр, обеспечивающий измерение напряжений до 5 В с такой же погрешностью $\pm 0,1$ В, относится к классу точности 1,5.

Список литературы

- 1 Ахтулов Л.А., Ахтулова Н.Л. Метрология, стандартизация и сертификация – М.: Наука, 2011.
- 2 2.Красных А. А., Кротов Ю.В. Метрология в задачах и тестах. Учебное пособие. – Киров, 2014.
- 3 Шабалдин Е.Д., Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. метрология и электрический измерения. – М.: Высшая школа, 2001.
- 4 Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 2008.
- 5 Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Высшая школа, 2001.
- 6 Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000.
- 7 Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
- 8 Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: ФАЗИС, ВЦ РАН, 2000.
- 9 Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. – М.: ФАЗИС, ВЦ РАН, 2000.
- 10 Кудряшев Л.С., Гуринович Г.В., Рензьева Т.В. Стандартизация, метрология, сертификация в пищевой промышленности: Учебник. – М.: ДеЛи принт, 2002.
- 11 Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. – Изд. 7-е, стер. – М.: Высшая школа, 2001.
- 12 ГОСТ ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
- 13 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов /Нефедов В.И. , Хахин В.И., Федорова Е.В. и др.; Под ред. Нефедова В.И. – М.: Высшая школа, 2001.
- 14 РМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. Метрология. Основные термины и определения (взамен ГОСТ 16263–70) – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000.
- 15 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов – М.: Логос, 2001.
- 16 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Карманная энциклопедия студента: Учебное пособие – М.: Логос, 2001.
- 17 Третьяк Л.Н. Обработка прямых измерений с многократными наблюдениями: Учебное пособие – Оренбург: ИПК ОГУ, 2002.
- 18 Третьяк Л.Н., Канюков В.Н. Пакет прикладных программ. Математическая обработка результатов многократных измерений. Зарегистрирован в ФАП ОГУ, 9.06.2000, Рег. Номер 6-2000.

Содержание

1 Лекция №1. Введение. Физические величины и их единицы.....	5
2 Лекция №2. Основные вопросы измерений средств	9
3 Лекция №3. Погрешности косвенных измерений	13
4 Лекция №4. Оценка результата измерения	16
5 Лекция №5. Прямые измерения с многократными наблюдениями	20
6 Лекция №6. Техника и методика электрических измерений	24
7 Лекция №7. Средства измерений	29
8 Лекция №8. Измерение физических величин	32
9 Лекция №9. Влияние входа прибора на показания и градуировку шкал	36
10 Лекция №10. Осциллографический метод измерения параметров сигналов	42
11 Лекция №11. Основные приемы работы с измерительными приборами..	45
Список литературы	50

Ускембаева Бағдат Оралбековна
Туртаева Әселя Серікқызы

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Конспект лекции
для студентов специальности
5В070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение

Редактор _____
Специалист по стандартизации _____

Подписано в печать ____ . ____ . ____
Тираж 75 экз.
Объем 3,13 уч. – изд. л.

Формат 60x84 1/16
Бумага типографская №1
Заказ ____ . Цена 1570 тг.

Копировально – множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
г. Алматы, ул. Байтурсынулы, 126