

Основы метрологии, стандартизации и сертификации

Антонюк Евгений Михайлович

д.т.н., профессор,

заместитель заведующего кафедрой ИИСТ

по учебной работе

1.1. Метрология

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В практической жизни человек сталкивается с измерениями каждый день. С незапамятных времен измеряют такие величины как длина, время и масса.

Измерения имеют первостепенное значение для торговли, учета материальных ресурсов, планирования, для обеспечения качества продукции, совершенствования технологий, медицины.

Метрология играет важную роль для прогресса технологий и должна развиваться темпами, опережающими другие области науки и техники, так как для каждой из них точные измерения являются одним из основных путей совершенствования. Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов с заданной точностью и достоверностью. Средством метрологии является совокупность измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих требуемую точность.

1.1. Метрология

Метрология состоит из **трех разделов**:

Теоретическая метрология — раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Законодательная метрология — раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества.

Практическая (прикладная) метрология — раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

1.2. Основные задачи метрологии

К основным задачам метрологии согласно **РМГ 29-99** относят:

установление единиц физических величин, государственных эталонов и образцовых средств измерений;

- разработку теории, методов и средств измерений и контроля;
- обеспечение единства измерений;
- разработку методов оценки погрешностей, состояния средств измерения и контроля;
- разработку методов передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам измерений.

1.3. История развития метрологии

1835 год - указ "О системе Российских мер и весов" - утверждены эталоны длины и массы - платиновая сажень и платиновый фут;
XVIII век — установление эталона метра (эталон хранится во Франции, в Музее мер и весов; в настоящее время является в большей степени историческим экспонатом, нежели научным инструментом);

1832 год — создание Карлом Гауссом абсолютных систем единиц;

1835 год - указ "О системе Российских мер и весов" - утверждены эталоны длины и массы - платиновая сажень и платиновый фут;

1875 год — подписание международной **Метрической конвенции**;

1893 год — Учреждение по инициативе Д.И. Менделеева Главной палаты мер и весов в Санкт-Петербурге;

1918 год — декрет Совета Народных Комиссаров "О введении Международной метрической системы мер и весов";

1960 год — разработка и установление **Международной системы единиц (СИ)**;

XX век — метрологические исследования отдельных стран координируются Международными метрологическими организациями.

1.4. Метрологические организации

Вопросы стандартизации в области метрологии решают созданные согласно Метрической конвенции Международное бюро мер и весов и Международный комитет мер и весов.

Раз в четыре года в штаб-квартире Бюро проходят **Генеральные конференции** по мерам и весам, на которых принимаются решения направленные на улучшение и распространение международной системы единиц, а также рассматриваются другие вопросы, связанные с деятельностью **МКМВ** и **МБМВ**. Участниками Генеральных конференция являются представители всех стран-участниц метрической конвенции и наблюдатели от ассоциированных членов.

Международное бюро мер и весов — организация, отвечающая за обеспечение существования единой системы измерений во всех странах-участницах Метрической конвенции. Для этого осуществляется сравнение национальных эталонов единиц измерения и проводятся исследования в области метрологии, направленные на увеличение точности измерений. Штаб-квартира Бюро находится во Франции недалеко от Парижа.

1.4. Метрологические организации

В Российской Федерации главными **административными органами** являются Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии и наследник Главной палаты мер и весов **ВНИИМ** им. Менделеева, который является сегодня одним из крупнейших мировых центров научной и практической метрологии, головной организацией страны по фундаментальным исследованиям в метрологии, Главным центром государственных эталонов России.

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом в сфере технического регулирования и метрологии.

ВНИИМ подчинен Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии.

В июле 1994 г. Постановлением Правительства РФ ВНИИМ присвоен статус Государственного научного центра РФ. Как Государственный научный центр РФ ВНИИМ подчинен Министерству образования и науки и входит в Ассоциацию государственных научных центров.

1.5. Основные законы и документы

В России следующие документы и нормативные акты являются основными в области метрологии:

- Метрическая конвенция;
- Закон «Об обеспечении единства измерений». №4871-1 от 27 апреля 1993 г. (в ред. ФЗ от 10.01.2003 N 15-ФЗ);
- **РМГ 29-99**. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

Также вы можете посмотреть более подробный список в html-версии.

Рекомендации РМГ 29-99 содержат основные термины и определения в области метрологии. Термины, установленные РМГ 29-99, рекомендуется применять **во всех видах** документации, научно-технической, учебной и справочной литературе по метрологии, входящих в сферу работ по стандартизации и (или) использующих результаты этих работ.

1.6. Сайты по теме

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии — www.gost.ru ;

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева — www.vniim.ru ;

Международное бюро мер и весов — www.bipm.org ;

2. Терминология метрологии

В метрологии используются следующие **основные понятия и определения**:

физическая величина — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них;

измеряемая физическая величина — физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи;

единица измерения физической величины — физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин;

система единиц физических величин — совокупность основных и произвольных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин;

размер физической величины — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Предполагается, что размер физической величины существует объективно (вне зависимости от того измеряем мы эту величину или нет);

2. Терминология метрологии

значение физической величины — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Конкретное значение физической величины является результатом ее измерения;

истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину;

действительное значение физической величины — значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Например, при поверке некоторого (испытываемого) вольтметра его показания сравнивают с показаниями более точного (образцового) вольтметра. В этом случае показания образцового вольтметра принимают за действительное значение напряжения;

измерение физической величины — совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины (установление значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств);

2. Терминология метрологии

результат измерения физической величины — значение величины, полученное путем ее измерения – установленное значение величины, характеризующей свойство физического объекта, представляемое действительным числом с принятой размерностью (размерность определяется выбранной единицей измерений);

точность измерений — одна из характеристик измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения;

мера точности — погрешность результата измерения — отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины (истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях, на практике используют действительное значение);

средство измерений — техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени;

мера физической величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью;

2. Терминология метрологии

метрологическая характеристика средства измерений — характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность;

метрологическое обеспечение измерений — деятельность, направленная на создание эталонных средств измерений, а также разработку и применение метрологических правил и норм, обеспечивающих требуемое качество измерений;

метрологическая аттестация средства измерений — признание метрологической службой узаконенным для применения средства измерений единичного производства (или ввозимого единичными экземплярами из-за границы) на основании тщательных исследований его свойств;

поверка средств измерений — установление органом государственной метрологической службы (или другими официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

3.1. Физические величины

С помощью измерений мы познаем объекты и процессы окружающего мира, которые характеризуются своими свойствами. Свойства, для которых могут быть установлены и воспроизведены градации определенного размера называют физическими величинами.

Физическая величина — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Качественная сторона понятия физическая величина определяет род величины (длина, масса), а количественная ее «размер» (длина, масса конкретного объекта). Размер физической величины существует объективно независимо от того знаем мы его или нет.

Различают **семь основных физических величин**, которые характеризуют фундаментальные свойства материального мира:

- длина;
- масса;
- время;
- сила электрического тока;
- термодинамическая температура;
- количество вещества;
- сила света.

3.1. Физические величины

С помощью этих и двух дополнительных величин — плоского и телесного углов, — введенных исключительно для удобства, образуют производные физические величины и обеспечивают описание свойств физических объектов, явлений и процессов.

Величины делятся на **реальные и идеальные**. Идеальные величины являются моделью реальных понятий и используются в основном в математике. Физические величины свойственны реальным объектам, явлениям и процессам. Реальные величины делятся на физические и нефизические. Нефизические величины используются в нефизических науках — экономике, философии, социологии и т.п.

Физические величины разумно разделить на измеряемые и оцениваемые. Изменяемые физические величины могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования единиц измерения является отличительным признаком измеряемой физической величины. Если для физической величины нельзя ввести единицу измерения, то она относится к оцениваемым. Величины оценивают и измеряют при помощи шкал.

Шкала величины — упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

3.1. Физические величины

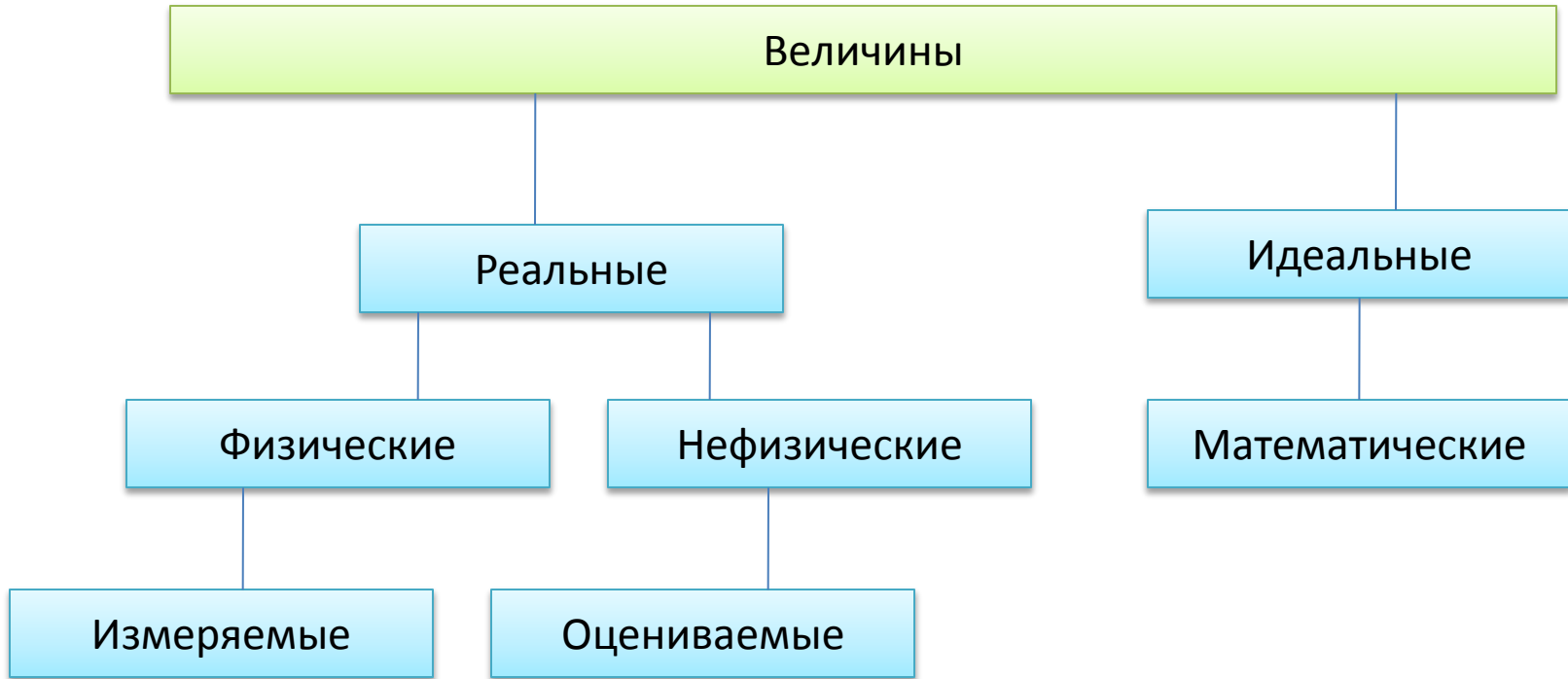


Рис. 3.1. Классификация величин

3.2. Классификация физических величин

Физические величины делятся по видам явлений на следующие группы:

Вещественные — описывают физические и физико-химические свойства веществ и материалов. Вещественные физические величины называют также пассивными потому, что для их измерения необходимо формировать сигнал измерительной информации при помощи вспомогательного источника энергии.

Энергетические — описывают энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. Энергетические физические величины называют активными.

Характеризующие протекание процессов во времени — к этой группе относят различного рода спектральные характеристики корреляционные функции и другие. По принадлежности к различным **группам физических процессов** физические величины подразделяют на следующие:

- пространственно-временные;
- механические;
- тепловые;
- электрические и магнитные;
- акустические;
- световые;
- физико-химические;
- ионизирующих излучений;
- атомной и ядерной физики.

Также физические величины могут быть размерными и безразмерными.

3.2. Классификация физических величин



Рис. 3.2. Классификация физических величин

3.3. Основное уравнение измерения

Значение физической величины Q — это оценка ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Числовое значение физической величины q — отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной физической величины.

Единица физической величины $[Q]$ — это физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице и применяемое для количественного выражения однородных физических величин.

Измерение — познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной физической величины с известной физической величиной, принятой за единицу измерения.

Уравнение

$$Q=q[Q]$$

называют **основным уравнением измерения**. Простейшее измерение заключается в сравнении физической величины Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$.

3.4. Размер физической величины

Размер измеряемой величины является ее количественной характеристикой. Получение информации о размере физической величины является целью любого измерения.

3.5. Размерность физической величины

Размерность является качественной характеристикой измеряемой физической величины, обозначается символом \dim (от слова dimension – размер, англ.), например размерности основных физических величин обозначаются так: $\dim m = M$, $\dim t = T$.

Размерность производной физической величины определяется математическим выражением, связывающим эту физическую величину с основными и показывающим во сколько раз изменится производная при изменении основных единиц.

Если с изменением основной величины в n раз производная величина изменится в n^p раз, то говорят, что данная производная единица обладает размерностью p относительно основной единицы. (Например, размерность площади равна двум — m^2 , а размерность объема — трем — m^3 относительно основной единицы длины — m).

3.5. Размерность физической величины

Формула размерности производной единицы представляет собой одночлен, составленный из размерностей основных единиц, причем эти размерности (степени) могут быть положительными, отрицательными, целыми и дробными.

Размерности обладают **следующими свойствами**:

- если числовое значение величины A равно произведению величин B и C , то размерность A равна произведению размерностей B и C — $[A]=[B] \times [C]$;
- если числовое значение величины A равно отношению величин B и C , то размерность A равна отношению размерностей B и C — $[A]=[B]/[C]$;
- если числовое значение величины A равно степени n числового значения величины B , то размерность A равна степени n размерности B — $[A]=[B]^n$.

Эти свойства используются при преобразовании формул размерности.

Понятие размерности широко **используется**:

- для перевода единиц из одной системы измерений в другую;
- для проверки правильности сложных расчетных формул;
- при выяснении зависимости между величинами.

3.6. Шкалы

В практической деятельности необходимо проводить измерения количественных и качественных свойств объектов, явлений и процессов. Разнообразные проявления (количественные или качественные) любого свойства образуют множества, отображения элементов которых образуют шкалы измерения этих свойств.

Различают **пять типов** шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные.

Шкалы наименований и порядка называют **неметрическими** (концептуальными), а шкалы интервалов и отношений — **метрическими** (материальными). Абсолютные и метрические шкалы относятся к линейным.

3.6. Шкалы. Шкалы наименований

Шкалы наименований — простейшие из шкал основаны на соотношении эквивалентности (равенства), используются для различения объектов. Примерами таких шкал являются классификация цвета по наименованиям (атласы цветов до 1000 наименований) и нумерация игроков спортивных команд, а также номера телефонов, паспортов и индивидуальные номера налогоплательщиков.



Рис. 3.3. Паспорт гражданина РФ

3.6. Шкалы. Шкалы порядка

Шкалы порядка — расположенные в порядке возрастания и убывания размеры измеряемой величины. Расстановка размеров в порядке их возрастания называется ранжированием. По шкале порядка сравнивают однородные объекты, значения интересующих свойств которых неизвестны. Шкала порядка не может дать информации на сколько или во сколько раз один объект больше или меньше, лучше или хуже другого. Эти шкалы возможно применять для числового оценивания величин в тех случаях, когда отсутствует единица величины. Для этого некоторые точки на шкале фиксируют в качестве опорных (реперных). Недостатком реперных шкал является неопределенность интервалов между реперными точками. Поэтому результаты оценивания **нельзя** складывать, перемножать, подвергать другим арифметическим действиям.

Примерами таких шкал служат оценки студентов по баллам (неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, отлично) и сила ветра по шкале Бофорта, упомянутая ранее.

3.6. Шкалы. Шкалы интервалов

Шкалы разностей (интервалов) отличаются от шкал порядка тем, что по шкале интервалов можно судить еще и о том, на сколько объект больше или меньше другого. На шкале интервалов откладывается только разность значений физической величины, но само значение остается неизвестным.

Шкала интервалов может содержать как положительные, так и отрицательные значения. Примером шкалы интервалов служат шкала температур Цельсия.

Шкалу интервалов можно увидеть
на простом уличном термометре

Значения могут быть
отрицательными и положительными

За 0 принята температура таяния льда

1 интервал равен 1 градусу Цельсия



Рис. 3.4. Термометр

3.6. Шкалы. Шкалы отношений

Шкалы отношений — интервальная шкала, но естественным началом, может отражать не только на сколько один показатель больше или меньше другого, но и во сколько. Соответственно, к шкале интервалов применимы такие арифметические действия как сложение, вычитание, умножение и деление. Шкала отношений **не содержит отрицательных значений**.

Примером шкалы отношений служит шкала измерительной линейки. Шкалы отношений описываются основным уравнением измерения. Шкала отношений является самой совершенной и информативной.



Рис. 3.5. Измерительная линейка

3.6. Шкалы. Абсолютные шкалы

Абсолютные шкалы обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеют естественное однозначное значение единицы измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослабления и др. Для образования многих единиц в системе СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал. Среди этих шкал существуют шкалы со значениями от 0 до 1 (коэффициент полезного действия, отражения).

4. Системы физических величин и их единиц

Развитие естественных и технических наук, необходимость обмена результатами привело к созданию систем единиц физических величин (ФВ).

Система физических единиц строится на базе знаний о физических процессах, протекающих в природе – известных физических законах. Так, выбрав произвольно единицы измерения нескольких физических величин и зная физические законы, связывающие их с другими величинами можно получить единицы ФВ.

Впервые понятие системы единиц физических величин ввел **К.Гаусс**. Согласно его методу сначала устанавливаются (выбираются) несколько произвольных величин, независимых от других. Единицы этих величин называются **основными**. Основные единицы выбираются таким образом, чтобы используя физические законы можно было получить другие - **производные** единицы. Полная совокупность основных и производных единиц образуют систему единиц ФВ.

4.1. Система единиц физических величин СИ

Первоначально в разных странах были созданы свои системы единиц. В основном они строились на базе трех единиц физических величин: длина, масса, время и условно назывались механическими. Например, системы: метр, килограмм, секунда (**МКС**); сантиметр, грамм, секунда (**СГС**). Эти системы удобны в применении в механике, однако для электрических и магнитных величин встретились серьезные трудности. В течении некоторого времени применяли так называемую техническую систему единиц (длина, сила, время): метр, килограмм-сила, секунда (**МКГСС**). Такая система удобна для вычисления и вывода многих технических величин, но большим недостатком этой системы единиц является то, что единица массы в ней получилась числом равной 9,81 кг, что нарушает метрический принцип десятичности мер, а также то, что трудно согласуется с практическими электрическими единицами.

В соответствии с потребностями отдельных отраслей науки технические системы единиц расширялись до четырех единиц. Так появились система тепловых единиц: метр, килограмм, секунда, градус температурной шкалы (**МКСГ**); система единиц для электрических и магнитных измерений: метр, килограмм, секунда, ампер (**МКСА**); система световых единиц: метр, килограмм, секунда, кандела (**МКСК**).

4.1. Система единиц физических величин СИ

Наличие ряда систем создало неудобства при обмене результатами, при пересчете из одной системы единиц в другую, что привело к необходимости создания единой универсальной системы единиц, которая охватывала бы все отрасли науки и была бы принята в международном масштабе.

В 1948 г. на IX Генеральной конференции по мерам и весам было рассмотрено предложение о принятии единой практической системы единиц. Международным комитетом мер и весов был произведен официальный опрос мнений научных кругов всех стран и на этой основе составлены рекомендации по установлению единой практической системы единиц.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам принимает международную систему и присваивает ей наименование “Международная система единиц” (**System International – SI**, в русской транскрипции – СИ), в которой в качестве основных приняты единицы: метр, килограмм, секунда, Ампер, Кельвин, кандела. Позже в качестве основной в систему единиц была введена единица количества вещества – моль.

Эта система за короткое время получила широкое международное признание.

4.1. Система единиц физических величин СИ

В России действует **ГОСТ 8.417—2002**, предписывающий обязательное использование единиц СИ. В нём перечислены единицы физических величин, разрешённые к применению, приведены их международные и русские обозначения и установлены правила их использования.

По этим правилам, **при договорно-правовых отношениях** в области сотрудничества с зарубежными странами, а также в поставляемых за границу вместе с экспортной продукцией технических и других документах **разрешается применять только** международные обозначения единиц. Применение международных обозначений обязательно также на шкалах и табличках измерительных приборов.

4.1. Система единиц физических величин СИ

В России действует **ГОСТ 8.417—2002**, предписывающий обязательное использование единиц СИ. В нём перечислены единицы физических величин, разрешённые к применению, приведены их международные и русские обозначения и установлены правила их использования.

По этим правилам, **при договорно-правовых отношениях** в области сотрудничества с зарубежными странами, а также в поставляемых за границу вместе с экспортной продукцией технических и других документах **разрешается применять только** международные обозначения единиц. Применение международных обозначений обязательно также на шкалах и табличках измерительных приборов.

Таблицы основных и производных, а также кратных и дольных, а вы можете посмотреть в html-версии.

4.4. Относительные единицы

Часто используют для измерения физической величины отношение этой величины к одноименной физической величине. Это отношение является **безразмерным**. К таким относятся атомные или молекулярные массы химических элементов, которые выражаются по отношению к одной двенадцатой массы углерода-12.

Отношения величин выражаются:

- в безразмерных единицах, когда отношение равно единицам;
- в процентах, когда отношение находится в диапазоне до 10^{-2} ;
- в промилле, когда отношение находится в диапазоне до 10^{-3} ;
- в миллионных долях, когда отношение находится в диапазоне до 10^{-6} и т.д.

4.5. Логарифмические единицы

В виде логарифмических величин выражаются частотный интервал, ослабление, усиление, уровни звукового давления и др. Единицей логарифмической величины является бел (Б), который выражается через логарифм отношения одноименных физических величин:

- $1\text{Б} = \lg(P_1/P_2)$ при $P_2=10\times P_1$, где P_1, P_2 – одноименные энергетические величины мощности, энергии, плотности энергии и т.п.;
- $1\text{Б} = 2 \lg(F_1/F_2)$ при $F_2=10^{1/2}\times F_1$, где F_1, F_2 – одноименные величины напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т.п.

Для образования логарифмической единицы может использоваться не только десятичный логарифм, **а также натуральный или по основанию 2**, если это удобно для решения практической задачи. Часто в измерениях используется дольная единица бела – **децибел (дБ)** равная 0,1 Б.

5. Эталоны и образцовые средства измерения

По мере развития техники и международных связей **трудности использования** и сравнения результатов измерений из-за различия единиц возрастали, они стали тормозить научно-технический прогресс. Так во второй половине XVIII века в Европе насчитывалось до сотни различных футов, как единиц измерения длины, около полусотни различных миль, свыше 120 различных фунтов. Кроме того, положение сложилось так, что соотношение между дольными и кратными единицами были необычайно разнообразными (Например, 1 фут = 12 дюймам = 304,8 мм).

В 1790 г. во Франции **было принято решение о создании** системы новых мер, "основанных на неизменном прототипе, взятом из природы, с тем, чтобы ее могли принять все нации". Было предложено считать единицей длины длину десятиmillionной части четверти меридиана Земли, проходящего через Париж. Эту единицу назвали метром. За **единицу массы** была принята масса 0,001 м³ чистой воды при температуре наибольшей плотности (+4°C); эта единица была названа килограммом. При введении метрической системы была не только установлена основная **единица длины**, взятая из природы, но и принята десятичная система образования кратных и дольных единиц, что является одним из важнейших ее преимуществ.

Однако, как показали последующие измерения, в четверти парижского меридиана содержится не 10 000 000, а 10 000 856 первоначально определенных метров. Но и это число нельзя считать окончательным, так как по мере развития науки более точные измерения дают другие значения.

5.1. Единица длины

В 1983 г. на XVIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято определение метра. По этому определению единица длины — метр — представляет собой расстояние, проходимое светом за $1/299792458$ долю секунды. Введению такого определения способствовало внедрение в эталонную технику лазеров. При этом размер единицы длины не изменился. **Основными нововведениями** были: переход от крптоновой лампы к лазерному излучению в источнике света на эталонных установках; использование в качестве основного постулата постоянство скорости света $c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с; объединение в одном эталоне воспроизведения размера трех величин: длины, времени и частоты; использование в эталоне источников света на пяти различных длинах волн.

Для воспроизведения единицы длины используется интерферометр Майкельсона. В интерферометре входящий световой пучок расщепляется на два, направленные по разным путям. На выходе световые пучки сходятся.

В зависимости от разности оптических длин пройденных путей можно определить разность хода как $\Delta = (n-1)l$, где n — показатель преломления среды, l — геометрическая длина пути.

Условие максимума интерференционной картины — $\Delta = l_1 - l_2 = k\lambda$, где λ — длина волны лазера. Условие минимума — $\Delta = l_1 - l_2 = (2k-1)\lambda/2$.

5.2. Единица массы

В качестве основной механической единицы XI Генеральной конференцией по мерам и весам была утверждена единица массы — килограмм. Килограмм — масса вещества, равная массе прототипа килограмма.

Прототип килограмма находится в Международном бюро по мерам и весам в Севре под Парижем. Он представляет собой цилиндр из сплава 90% платины и 10% иридия диаметром 39 мм и такой же высоты.

Для обеспечения единства измерений массы было изготовлено большое количество прототипов массы. Точность изготовления прототипов обеспечена на уровне 10^{-8} относительной погрешности. Прототипы аттестованы в Международном бюро по мерам и весам. В Россию в 1889 году был направлен прототип №12, который хранится во Всероссийском НИИ метрологии им. Д.И.Менделеева в Санкт-Петербурге.

По определению первоначально прототип массы должен был совпадать с массой одного кубического дециметра воды при ее наибольшей плотности при температуре $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 101325 Па . Однако было определено, что максимальная плотность воды равна $0,999972\text{ г/см}^3$, т.е. прототип массы оказался на 28 мкг больше.

5.3. Единица времени

Измерение времени человек естественно связывал с движением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Так, продолжительность суток разбивается на часы, минуты, **секунды** — $t = 24 \times 60 \times 60 = 86400$ с.

Однако, продолжительность суток в разное время года разное, поскольку Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Международным бюро по мерам и весам в 1956 г. было принято определение так называемой «эфemerидной секунды»: $1 \text{ с} = (1/31556925,9747)$ тропического года 1900.

В 1967 г. Международный комитет по мерам и весам принял определение единицы времени: **единица времени** — одна секунда — равна продолжительности $9,192631770 \times 10^9$ колебаний излучения при квантовом переходе между линиями сверхтонной структуры атома цезия ^{133}Cs , соответствующих переходу $[F = 4; m_F = 0] [F = 3; m_F = 0]$ основного состояния $^2S_{1/2}$. **Эталон единицы времени** реализован на установке для наблюдения резонанса в атомном цезиевом пучке — установке для воспроизведения единицы частоты системы СИ — Герца. Зафиксировав резонанс атомного пучка на частоте $9\,192\,631\,770$ Гц, эталон воспроизводит единицу времени — секунду.

5.4. Единица силы тока

Введение произвольной электрической единицы в практику измерений впервые было предложено на Международном конгрессе электриков в Чикаго в 1893 г. Было предложено ввести две абсолютные практические единицы электрических величин: 1 Вольт и 1 Ампер для измерения напряжения (разности потенциалов) и силы постоянного электрического тока. На практике силу постоянного электрического тока определяли по тем действиям, которые он оказывал на окружающую среду.

Ампер — сила, не изменяющегося во времени электрического тока, который, протекает в вакууме по двум бесконечным и параллельным проводникам пренебрежимо малого круглого поперечного сечения, находящимся друг от друга на расстоянии один метр, создают электрическую силу, действующую на эти проводники и равную $2 \times 10^{-7} \text{ Н}$ на каждый метр их длины.

В 1948 г. в основу эталона Ампера были положены **токовые весы**. Последние представляют собой рычажные равноплечие весы, в которых подвешенная подвижная катушка уравнивается грузом. Подвижная катушка входит в неподвижную коаксиально расположенную катушку. При прохождении по этим последовательно соединенным катушкам постоянного электрического тока подвижная катушка опускается. Для достижения равновесия на противоположное плечо необходимо положить груз. По его массе и судят о силе электрического тока. Погрешность такого эталона не превышает $10^{-3}\%$.

5.4. Единица силы тока

Введение в метрологическую практику эталона Вольта на основе эффекта Джозефсона и эталона Ома на основе эффекта Холла позволили повысить точность воспроизведения тока на два порядка. Современный эталон ампера состоит из **двух комплексов**:

- комплекса для установления размера Ампера через Вольт и Ом с использованием эффектов Джозефсона и Холла, который включает всебя меру напряжения, меру электрического сопротивления, сверхпроводящий компаратор тока и регулируемые источники тока;

- комплекса для установления размера Ампера через Фарад, Вольт, секунду, включает блок с набором мер постоянной емкости, интегратор, измерительный блок с частотомером, цифровым вольтметром и компаратором.

Эталон обеспечивает воспроизведение единицы силы тока со средним квадратическим отклонением результата измерений не превышающим 5×10^{-8} А при номинальном значении силы тока 1А и систематической погрешностью не превышающей 2×10^{-8} А при номинальном значении силы тока 1×10^{-3} А.

5.5. Единица термодинамической температуры

Термодинамическая температура является универсальной физической величиной, она характеризует состояние многих физических тел и процессов.

Единица термодинамической температуры – **Кельвин** определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

На эталонном уровне строится шкала термодинамической температуры, при этом используются температуры плавления и затвердевания чистых веществ.

Тройная точка воды это такое состояние чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. В условиях вакуума над тающим льдом устанавливается равновесное давление водяного пара, равное $p=611$ Па. Этому состоянию приписано значение термодинамической температуры $T=273,16$ К точно. Точка замерзания воды при нормальном атмосферном давлении $p=101325$ Па (1 атм.) расположена ниже тройной точки воды на $0,00993$ К.

XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1976 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила в качестве производной **шкалу Цельсия**, определив температуру как $t\text{ }^{\circ}\text{C} = (T-273,15)$ К.

5.5. Единица термодинамической температуры

В 1990 г. был утвержден последний состав Международной температурной шкалы (МТШ–90). Реперные точки МТШ–90 делятся на определяющие и вторичные. Список определяющих реперных точек приведен в таблице ниже.

Определяющие реперные точки — это точки температурной шкалы, для которых результаты измерений в разных странах хорошо совпали между собой.

Вторичные реперные точки охватывают более широкий диапазон температур. Шкала вторичных реперных точек содержит 27 значений. Самая высокая температура – температура затвердевания вольфрама — 3666 К.

На практике для точных измерений температуры используются платиновые термометры сопротивления или термопары, которые **градуируются** по реперным точкам. От платиновых термометров сопротивления и термопар размер единицы температуры передается образцовым и рабочим термометрам менее высокого класса точности.

Таблицу реперных точек МТШ-90 можно посмотреть в [html-версии](#).

5.6. Единица силы света

В 1967 году XIII Генеральная конференция по мерам и весам утвердила единицу силы света – канделу. **Кандела** – сила света в направлении нормали к отверстию абсолютно черного тела, имеющего температуру затвердевания платины $T=2045$ К и площадь $1/60$ см² при давлении 101325 Па.

Ранее эталон единицы силы света канделы представлял комплекс, в котором платина, расплавленная индукционной печью, нагревает керамическую трубку диаметром 2мм и длиной 40 мм. Излучение из трубки фокусируется на вход фотометра. Фотометр позволяет производить измерение энергии излучения на различных длинах волн. Такая структура имеет существенные источники погрешности: невозможно создать идеальный черный излучатель, поэтому коэффициент излучения всегда меньше единицы; температура излучающей полости несколько ниже температуры платины вследствие теплопроводности и неоднородности затвердевания платины; в оптической системе теряется часть световой энергии. Введение поправок делает возможным воспроизведение единицы силы света с точностью 0,1-0,2%.

В настоящее время воспроизведение единицы силы света с точностью 0,1% возможно с помощью источника (чаще всего используется вольфрамовая ленточная лампа накаливания, которая подбором силы тока излучает как черное тело с температурой 2045 К) и фотоприемника, рассчитанного на измерение энергетической мощности излучения на длине волны 555 нм. Измерения ведутся в единицах механической мощности – ваттах, а световой поток определяется через механический эквивалент света, равный 683 люмена на ватт (люмен – единица измерения светового потока).

5.7. Единица количества вещества

Для удобства описания химических процессов в систему СИ введена химическая основная единица — моль. **Моль** — количество вещества, имеющее столько структурных единиц, сколько их содержится в 12 граммах моноизотопа углерода C^{12} . Из определения видно, что точно это значение не установлено. По физическому смыслу оно равно постоянной **Авогадро** — числу атомов в грамм-эквиваленте углерода.

Эта величина практически дублирует основную единицу массы килограмм. Необходимо также отметить, что до сих пор **не существует реализации эталона этой единицы**. Многочисленные попытки независимого воспроизведения моля приводили к тому, что накопление точно измеренного количества вещества сводилось к необходимости выхода на другие эталоны физических величин. Например, попытка электрохимического выделения какого-либо вещества приводит к необходимости измерения массы и силы электрического тока; точное измерение числа атомов в кристаллах — к измерению линейных размеров кристалла и его массы, и др.

6.1. Система обеспечения единства измерений

Обеспечение единства измерений является одной из основных задач метрологии. Под единством измерений понимается такая технология организации и проведения измерений, при которой результаты измерений выражаются в известных единицах, размеры которых могут быть воспроизведены с помощью образцовых средств (эталонов), и погрешности которых могут быть определены с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Единство измерений должно обеспечиваться при решении любых задач науки и техники, при измерениях с любой точностью.

На государственном уровне единство измерений обеспечивается с помощью государственных и ведомственных служб, деятельность которых регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений. В Российской Федерации принят «**Закон Российской Федерации об обеспечении единства измерений**», который устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений. Закон регулирует отношения государственных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам изготовления, выпуска, эксплуатации, ремонта, продажи средств измерений и направлен на защиту прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики страны от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

6.1. Система обеспечения единства измерений

В соответствии с Законом:

Единство измерений — состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражены в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Понятие «единство измерений» охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц, разработку системы воспроизведения единиц и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью, проведение измерений с требуемой точностью и др. Единство измерений должно выдерживаться при любой точности измерений, необходимой отрасли экономики. Обеспечение единства измерений является задачей метрологических служб.

Метрологическая служба — служба, создаваемая в соответствии с законодательством для выполнения работ по обеспечению единства измерений и для осуществления метрологического контроля и надзора.

Закон определяет, что **Государственная метрологическая служба** находится в ведении Госстандарта России и включает: государственные научные метрологические центры; органы Государственной метрологической службы на территории республик в составе Российской Федерации, автономной области, автономных округов, краев, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга. Государственная система обеспечения единства измерений – **комплекс нормативных документов** межрегионального и межотраслевого уровней, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в стране (при требуемой точности), утверждаемых Госстандартом страны.

6.2. Передача размеров единиц физических величин

Обеспечение правильной передачи размера единицы физической величины осуществляется с помощью поверочной схемы.

Поверочная схема — нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерения (с указанием метода и погрешности при передаче). Поверочная схема строится в соответствии с ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочная схема. Содержание и построение» и рекомендациями МИ 83-76 «Методика определения параметров поверочных схем». Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема — поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текста, содержащего пояснения к чертежу.

Локальная поверочная схема — поверочная схема, распространяющаяся на средства измерения данной физической величины, применяемая в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации). Локальная поверочная схема не должна противоречить государственной. Она не может быть составлена при отсутствии государственной поверочной схемы. Поверочная схема включает эталон, объект поверки (средство измерений), метод поверки.

7.1. Классификация измерений

Существующее многообразие измерительных экспериментов для нахождения значения физических величин определяется как большим количеством этих величин, характером их изменения во времени, так и различными требованиями к качеству получаемых результатов. Классификация измерений позволяет структурировать множество измерительных процедур с целью их эффективной организации и использования.

Измерение — совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Измерения могут быть классифицированы **по следующим признакам:**

- способу получения результата измерений — прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения;
- отношению к изменению измеряемой величины — статические и динамические измерения;
- характеристике точности — равноточные и неравноточные измерения;
- числу измерений в ряду измерений — однократные и многократные измерения;
- выражению результата измерений — абсолютные и относительные измерения;
- метрологическому назначению — технические и метрологические измерения.

7.1. Классификация измерений



Рис. 7.1а. Классификация измерений

7.1. Классификация измерений



Рис. 7.16. Классификация измерений

7.2. Прямые измерения

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение физической величины получают **непосредственно** в результате выполнения измерительного эксперимента.

Например, измерение длины микрометром, силы тока амперметром, электрического сопротивления омметром.

7.3. Косвенные измерения

Косвенное измерение — определение искомого значения физической величины **на основании** результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. При косвенном измерении значение искомой величины y связано с измеряемыми некоторой функциональной зависимостью $y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — значения величин, полученных с помощью прямых измерений.

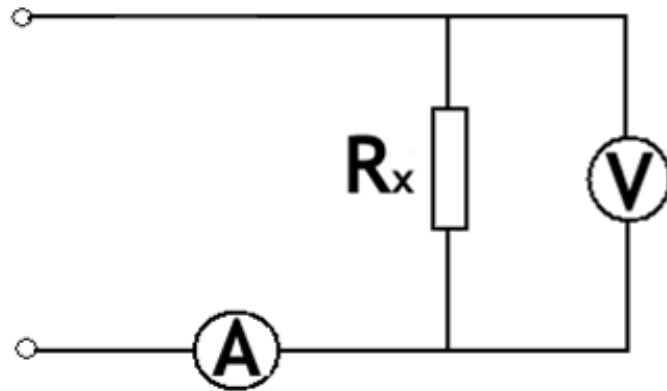
Например, значение сопротивления резистора R определяют из уравнения $R = U/I$, в которое подставляют значения напряжения U на резисторе и тока I через него.

7.3. Косвенные измерения – пример.

Схема косвенного измерения сопротивления (измерения силы тока и напряжения прямые)

2

Измеряем напряжение
вольтметром
 $U=84\text{ В}$



1

Измеряем силу тока
миллиамперметром
 $I=40\text{ мА}$



3

Находим сопротивление
 $R_x = U/I = 84/40 \cdot 10^{-3} = 2100\text{ Ом}$

Рис. 7.2. Пример косвенных измерений

7.4. Совместные измерения

Совместные измерения — проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними. По сути, совместные измерения – это одновременно проводимые косвенные измерения. При этом решают следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n, x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1m})=0; \\ F(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n, x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2m})=0; \\ \dots \\ F(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n, x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, \dots, x_{nm})=0, \end{array} \right.$$

где y_i — искомые величины, x_{ij} — значения измеренных величин.

7.4. Совместные измерения – пример

Например, для **нахождения зависимости** сопротивления резистора от температуры, определяемой выражением $R_t = R_0(1 + A_t)$, измеряют сопротивление резистора при двух различных температурах, составляют систему из двух уравнений и находят значения параметров R_0 , A .

Сначала измеряем сопротивление резистора при температуре t_1 и t_2 :

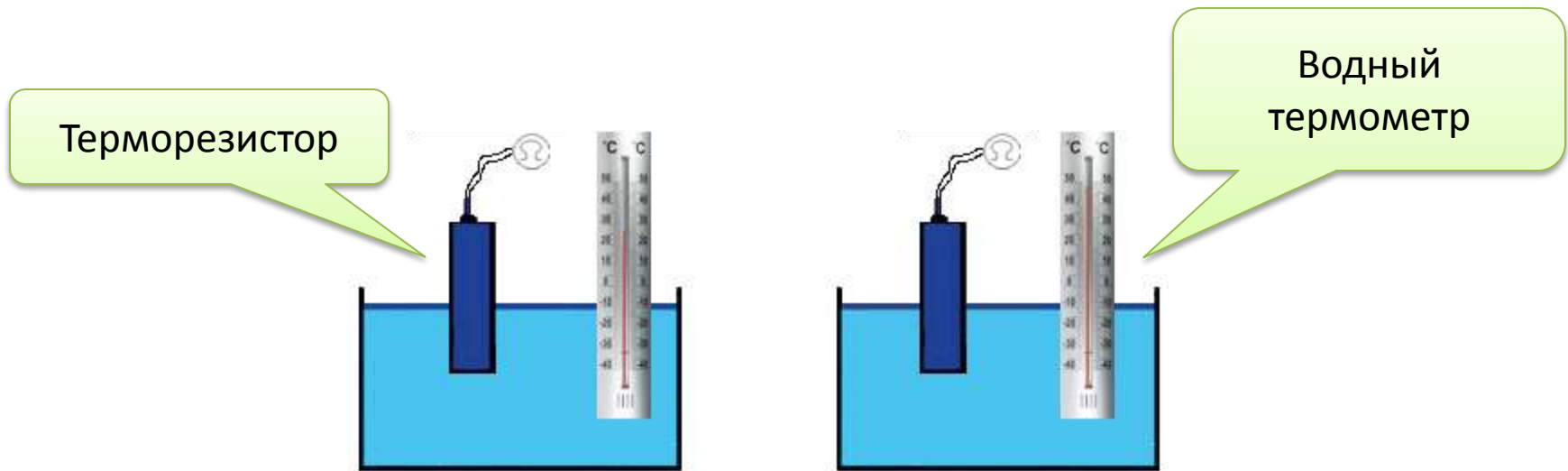


Рис. 7.3. Пример совместных измерений

Далее составляем систему уравнений:

$$R_{t1} = R_0(1 + At_1)$$

$$R_{t2} = R_0(1 + At_2)$$

где t_1 , t_2 — температуры в градусах Цельсия,

R_{t2} , R_{t1} — сопротивления резистора при температуре t_1 и t_2 соответственно.

R_0 и A — искомые параметры.

7.5. Совокупные измерения

Совокупные измерения — проводимые одновременно измерения **нескольких одноименных** величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Например, выполняют прямые измерения сопротивлений резисторов соединенных треугольником, а затем по результатам этих измерений рассчитывают значения сопротивлений самих резисторов.

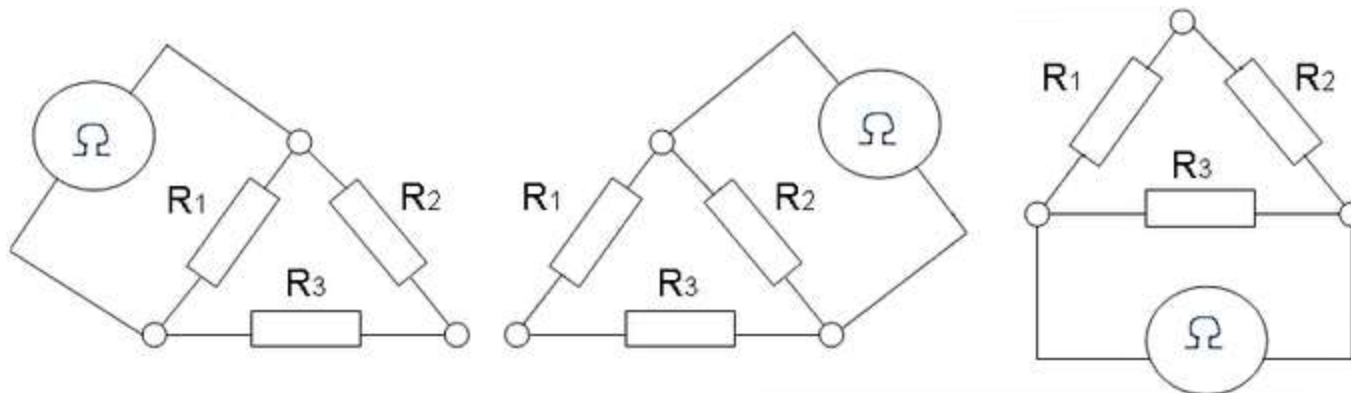


Рис. 7.4. Схема совокупных измерений

7.6. Статические измерения

Статическое измерение — измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за **неизменную** на протяжении времени измерения.

Пример: измерение неизменяющейся частоты синусоидального сигнала с помощью электронного осциллографа.

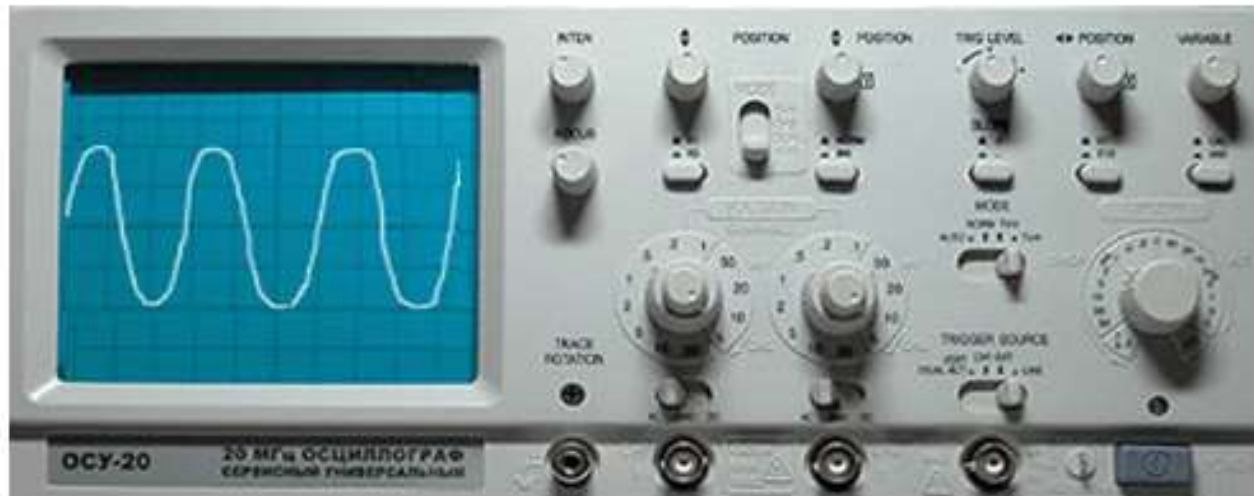


Рис. 7.5. Пример статического измерения

7.7. Динамические измерения

Динамическое измерение — измерение изменяющейся во времени физической величины.

Пример: измерение мгновенных значений, изменяющегося во времени напряжения, с помощью электронного осциллографа.

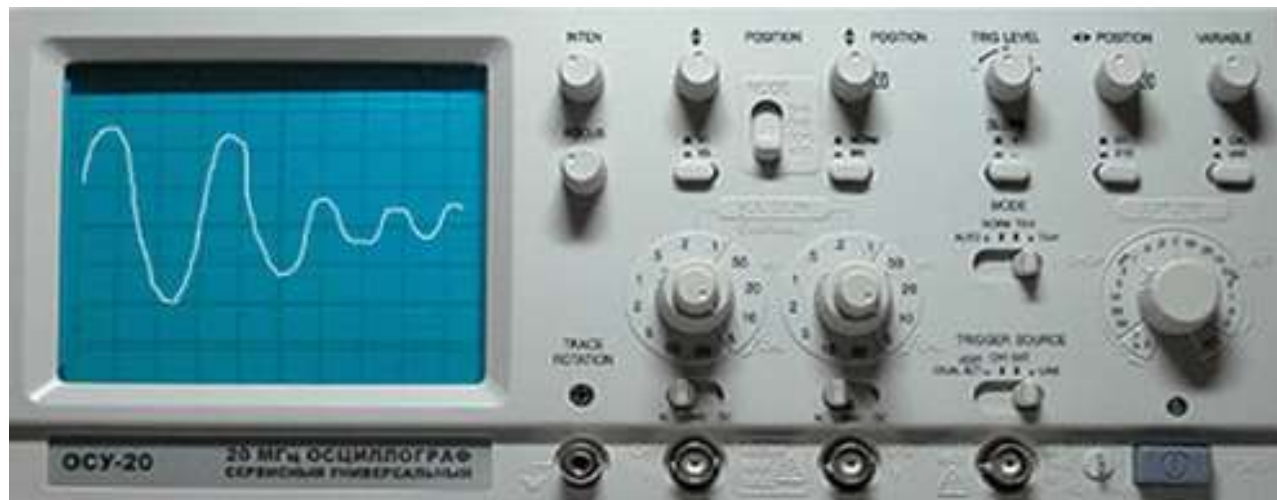


Рис. 7.6. Пример динамического измерения

7.8. Также измерения разделяют на

Равноточные измерения — ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Неравноточные измерения — ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Однократное измерение — измерение выполненное один раз. На практике, как правило, выполняются именно однократные измерения. В ряде случаев принципиально невозможно увеличивать число измерений одной и той же величины, например, измерение параметров, характеризующих запуск ракетносителей космических кораблей.

Многократное измерение — измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений. Результат многократных измерений получается из следующих друг за другом значений ряда однократных измерений. Однако перед началом обработки необходимо убедиться, что все измерения этого ряда являются равноточными.

7.8. Также измерения разделяют на

Абсолютное измерение — измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы F основано на измерении основной величины – массы (m) и использовании физической постоянной g (в точке измерения массы), в соответствии с уравнением $F=mg$.

Относительное измерение — измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Технические измерения — измерения с помощью рабочих средств измерения. Технические измерения выполняются с целью контроля и управления научными экспериментами, технологическими процессами, движением транспорта и т.д. Например, измерение ряда физических величин, характеризующих некоторый технологический процесс.

Метрологические измерения — измерения, выполняемые при помощи эталонов и образцовых средств измерений с целью воспроизведения единиц физических величин для передачи их размера рабочим средствам измерений. Пример, выполнение процедуры поверки рабочих средств измерений.

8. Методы измерений

Метод измерений — прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

В основе классификации методов измерения лежит способ применения меры при получении значения измеряемой величины. Выделяют несколько основных методов: непосредственной оценки и сравнения с мерой, последний, в свою очередь, подразделяется на нулевой, дифференциальный или разностный, замещением, дополнением.

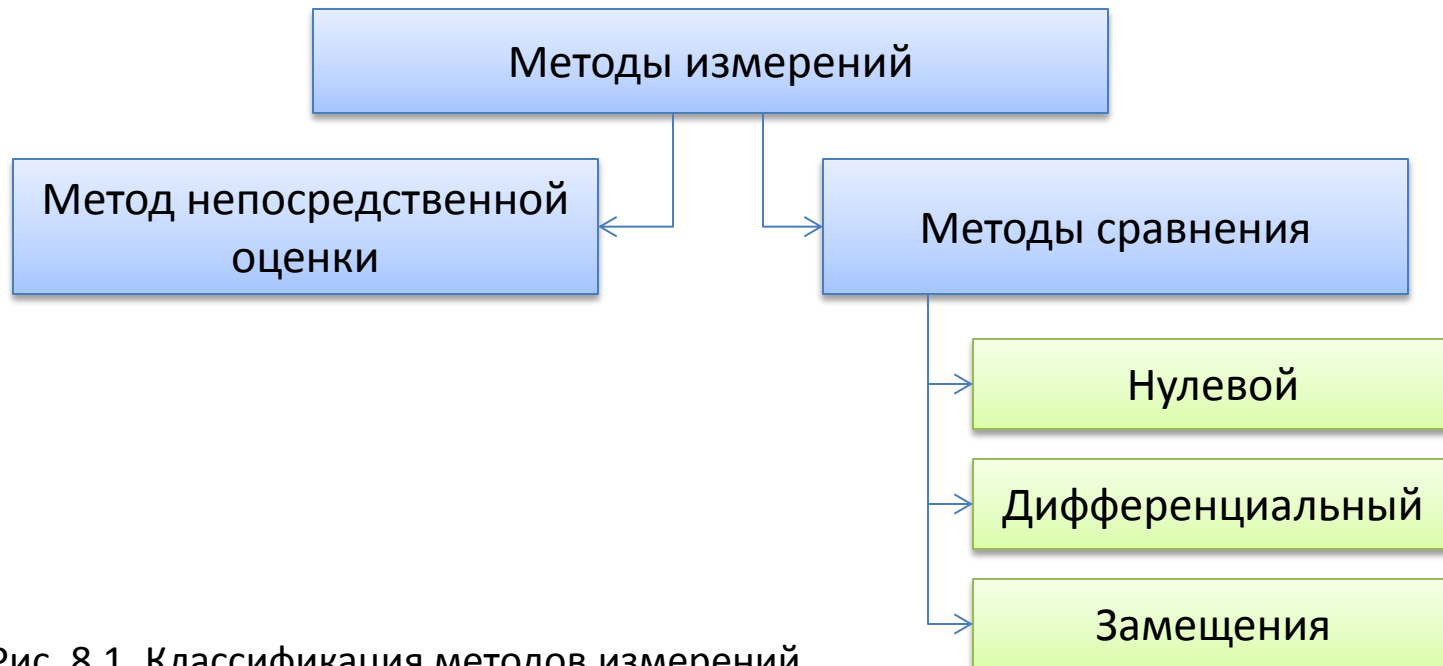


Рис. 8.1. Классификация методов измерений

8.1. Метод непосредственной оценки

Метод непосредственной оценки — метод измерения, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Результат измерения в этом случае определяется непосредственно по отсчетному устройству средства измерения. Использование меры в получении результата происходит опосредованно через процедуру градуировки **шкалы** средства измерения на этапе его производства.



Рис. 8.2. Иллюстрация метода непосредственной оценки

8.2. Нулевой метод измерений

Нулевой метод измерений — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Устройство, с помощью которого определяется равенство нулю указанной разности, называется нуль-индикатором.

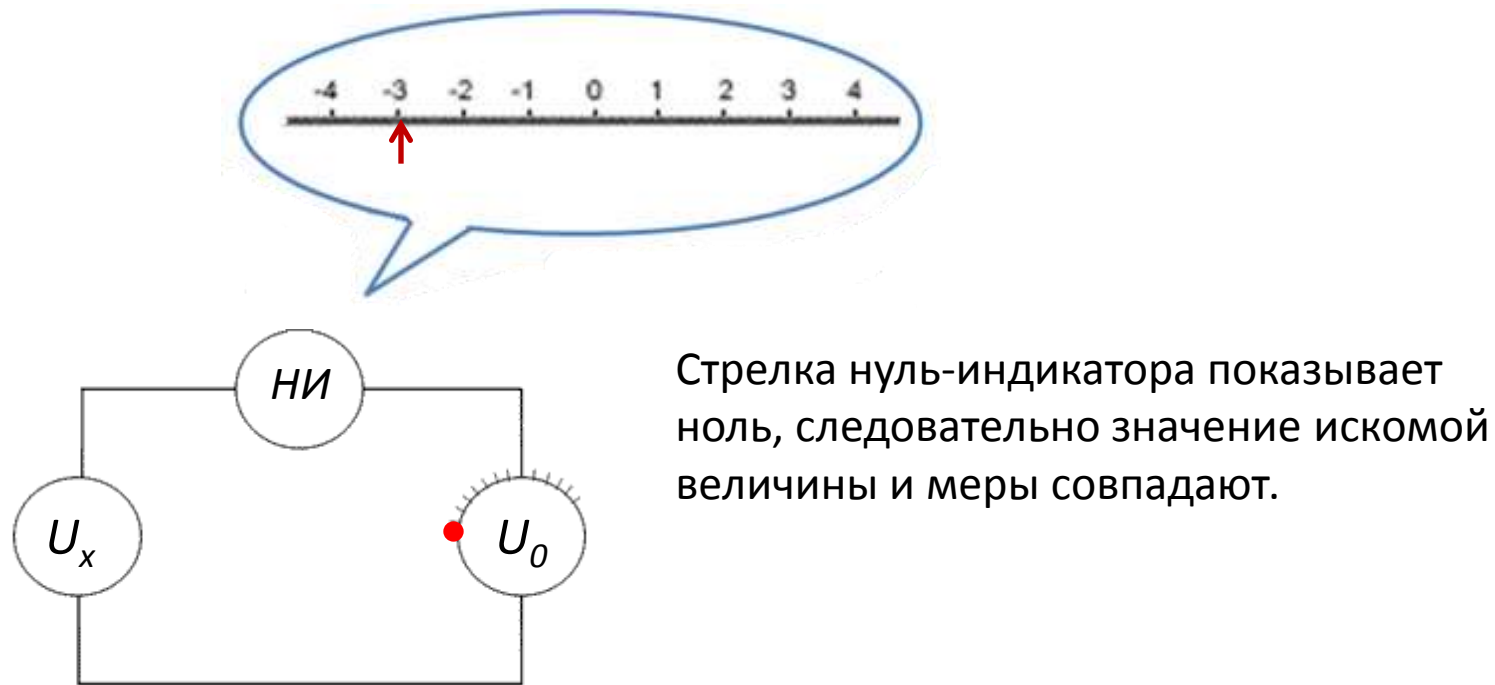
Данный метод позволяет получить **высокую точность** измерений, при применении высокоточных мер и **нуль-индикаторов**, обладающих высокой чувствительностью.

Пример: на рисунке приведена схема, поясняющая использование нулевого метода, где U_x — измеряемая величина; U_0 — мера; НИ — нуль-индикатор.

Изменяя значение меры, добиваются выполнения равенства $U_x = U_0$.

Признаком равенства этих значений является отсутствие тока через НИ $I_{\text{НИ}} = 0$.

8.2. Нулевой метод измерений - пример



Стрелка нуль-индикатора показывает ноль, следовательно значение искомой величины и меры совпадают.

Рис. 8.3. Иллюстрация нулевого метода измерений

8.3. Дифференциальный метод измерений

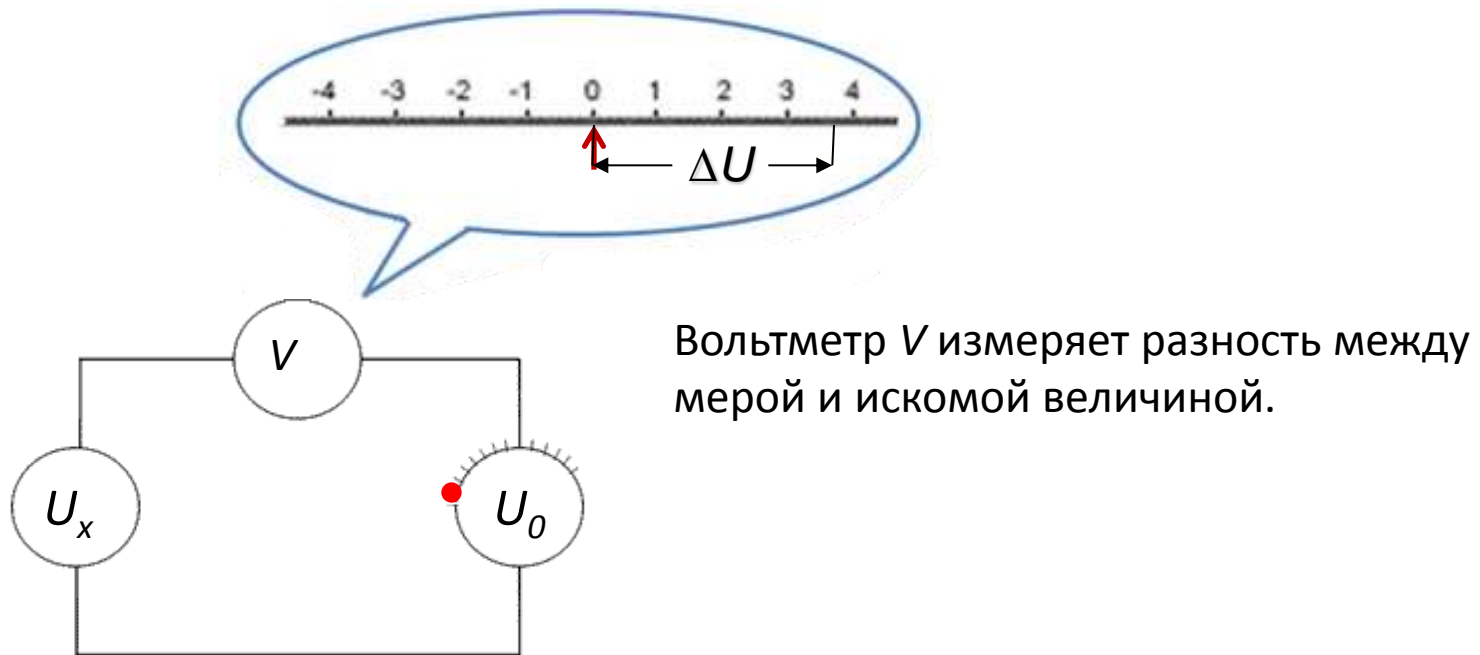
Дифференциальный или разностный метод измерений — метод измерения, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Результат определяется, как **сумма** показаний средства измерений и значения физической величины воспроизводимой мерой. Наибольшую точность данный метод позволяет получить при незначительном отличии между измеряемой величиной и известным значением, воспроизводимом мерой.

Особенностью данного метода является возможность получить результат измерения с **высокой точностью**, используя средство измерения разности сравнительно невысокой точности. Так, если относительная погрешность измерения разности ΔU составляет 1% и отношение $\Delta U/U_x$ также равно 1%, то измеряемая величина U_x определяется с погрешностью 0,01%.

8.3. Дифференциальный метод измерений - пример

На рисунке представлена обобщенная схема, построенная на основе дифференциального метода. V — вольтметр, измеряющий разность ΔU между значением измеряемого напряжения U_x и значением воспроизводимым образцовым источником напряжения. Тогда измеряемая величина определяется выражением $U_x = U_0 + \Delta U$.



Вольтметр V измеряет разность между мерой и искомой величиной.

Рис. 8.4. Иллюстрация дифференциального метода измерений

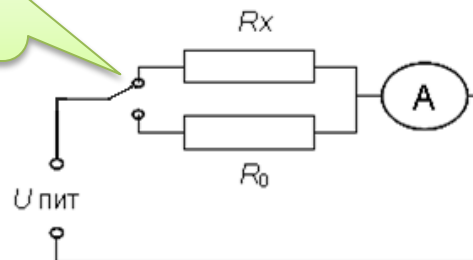
8.3. Метод измерений замещением

Метод измерений замещением — метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. С помощью средства измерения производится поочередное измерение искомой величины и величины, воспроизводимой мерой, результат определяется по этим двум значениям.

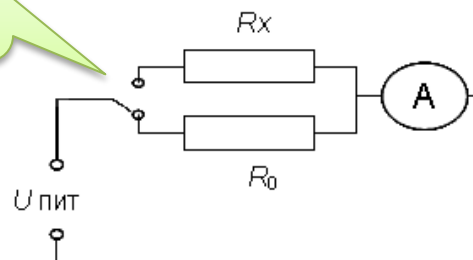
В качестве примера приведем обобщенную схему измерения значения сопротивления резистора на основе метода замещения. На первом шаге измеряется ток I_x через резистор R_x . На втором — ток I_0 через образцовое сопротивление R_0 . Искомая величина определяется из соотношения.

8.3. Метод измерений замещением - пример

Измеряется сила тока I_x через сопротивление R_x



Измеряется сила тока I_0 через сопротивление R_0



Искомая величина определяется по формуле $R_x = I_0 R_0 / I_x$

Рис. 8.5. Иллюстрация дифференциального метода измерений

9.1. Погрешности

Погрешность результата измерения — отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Погрешность результата измерения это абсолютная погрешность, которая выражается в единицах измеряемой физической величины

$$\Delta x = x - x_0$$

где x — результат измерения, x_0 — действительное значение измеряемой физической величины.

В зависимости от способа выражения различают абсолютную и относительную погрешности.

Абсолютная погрешность — погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, соответствует определению.

Относительная погрешность — погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины

$$\delta_x = \Delta x / x_0 \cdot 100 \approx \Delta x / x \cdot 100 \quad (\%)$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной, которая, как правило, выражается в процентах. Она наглядно отражает точность измерения заданной величины и используется при сравнении результатов измерений различными СИ.

9.1. Погрешности



Рис. 9.1. Классификация погрешностей измерений

9.1. Погрешности

Грубая погрешность (промах) — погрешность, существенно превышающая ожидаемую. Она может появляться при воздействии внешних факторов, изменении условий измерительного эксперимента, нарушении плана эксперимента и др. Результат измерения с грубой погрешностью должен быть отброшен, как не вызывающий доверия.

9.2. Статическая и динамическая погрешности

Статическая погрешность – погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения, для которого принята гипотеза о неизменности во времени измеряемой величины, т.е. постоянной физической величины.

Динамическая погрешность – погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения, которая возникает при измерении физической величины, изменяющейся во времени.

Динамическая погрешность обусловлена несоответствием показаний измерительного прибора значениям изменяющейся во времени физической величины за счет его инерционности или времени получения результата измерения.

Например, погрешность при дискретизации во времени непрерывно изменяющейся физической величины и погрешность датирования, связанная с привязкой ко времени результата измерения.

9.3. Систематическая погрешность

Систематическая погрешность измерения — **составляющая** погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющейся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

По причинам возникновения систематическая погрешность **разделяется** на:

- методическую;
- инструментальную;
- субъективную;
- погрешность из-за изменений условий измерений.

9.3. Систематическая погрешность - методическая

Методическая погрешность — погрешность метода измерений — **составляющая систематической** погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Методическая погрешность **обусловлена**:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства (погрешность неадекватности);
- влиянием способа применения СИ;
- выбором разрядности аналого-цифрового преобразования — погрешность от реализации с определенным количеством разрядов — погрешность от квантования по уровню;
- влиянием алгоритмов, по которым производятся вычисления результатов измерений (например, алгоритмы нормализации, масштабирования, функционального преобразования для получения результата в цифровых измерительных приборах).

9.3. Систематическая погрешность - инструментальная

Инструментальная погрешность измерения — составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений. Она является суммарной от погрешностей реализации отдельных функциональных узлов и зависит от структуры устройства, характеристик электронных элементов схемы, таких как дрейф нуля усилителя, шумов в линиях передачи и контактных соединениях, других особенностей реализации.

Выделение методической и инструментальной составляющих погрешности **является важным** при планировании структуры измерительного эксперимента, при проектировании измерительных устройств, измерительных каналов и систем.

Погрешность из-за изменений условий измерений

Погрешность (измерения) из-за изменений условий измерений — составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием **неучтенного влияния** отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

9.3. Систематическая погрешность - субъективная

Субъективная погрешность измерения — составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора. Обычно эту погрешность связывают с погрешностью считывания — считыванием результата измерения со шкалы прибора (аналоговая шкала с делениями), когда в зависимости от угла взгляда на шкалу можно получить разные результаты.

Однако при применении цифровых измерительных средств эта составляющая погрешности **исключается**. В таком случае остается причина возникновения субъективной погрешности связанная с правильностью постановки измерительного эксперимента, применения измерительных средств, в конечном счете, с квалификацией инженера исследователя.

9.4. Случайная погрешность

Случайная погрешность измерения — составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проводимых с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины

$$\Delta x_{\text{сл}} = \varepsilon$$

При обработке результата измерения систематическая и случайная составляющая суммируются

$$\Delta x = \Delta x_{\text{сист}} + \Delta x_{\text{сл}}$$

Причиной появления случайной погрешности является множество изменяющихся факторов, влияющих на процесс измерения, контролировать которые практически невозможно.

10. Обработка результатов измерений

Целью обработки результатов измерений (наблюдений) является установление значения измеряемой величины и оценка погрешности полученного результата измерения.

Методы обработки результатов наблюдений могут быть разными в зависимости от предварительной информации, которой располагает экспериментатор об источниках и характере проявления погрешностей, условиях эксперимента, свойствах используемых средств измерений, от вида измерений, числа выполненных наблюдений и других причин.

10.1. Алгоритм обработки прямых многократных измерений

1. Исключить систематическую погрешность из каждого наблюдения, т.е. получить исправленный ряд x_1, x_2, \dots, x_n

2. Найти действительное значение измеряемой величины – среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n}$$

3. Найти случайные отклонения результатов наблюдения по формуле

$$\rho_1 = x_1 - \bar{x}; \rho_2 = x_2 - \bar{x}; \dots; \rho_n = x_n - \bar{x}$$

4. Проверить правильность нахождения \bar{x} используя свойство случайных отклонений

$$\sum_n \rho_i = 0;$$

5. Определить дисперсию(или ее оценку) среднего арифметического по формулам

$$\sigma^2[\bar{x}] = \frac{\sigma^2[x]}{n} \quad S^2[\bar{x}] = \frac{1}{n} S^2[x] \quad \text{где } \sigma^2[x] \text{ дисперсия исправленного ряда наблюдений;}$$

10.1. Алгоритм обработки прямых многократных измерений

$S^2[\bar{x}]$ - оценка дисперсии исправленного ряда наблюдений, которая определяется по формуле

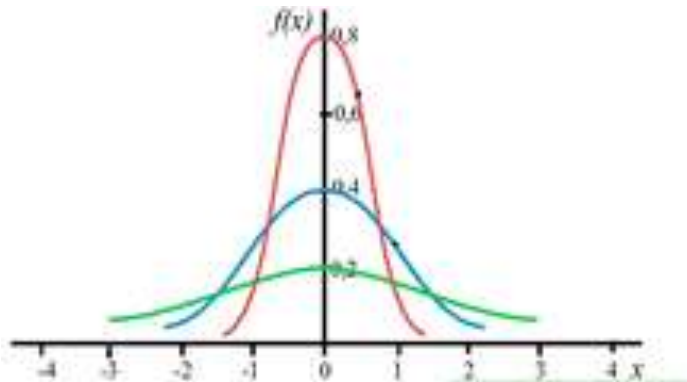
$$S^2[x] = \frac{1}{n-1} \sum_n \rho_i^2$$

6. Найти доверительный интервал погрешности измерения и записать результат измерения с доверительной вероятностью P в виде

$$x_{\text{и}} = \bar{x} \pm z_p \frac{\sigma[x]}{\sqrt{n}} \quad \text{или} \quad x_{\text{и}} = \bar{x} \pm t_p(f) \frac{S[x]}{\sqrt{n}}$$

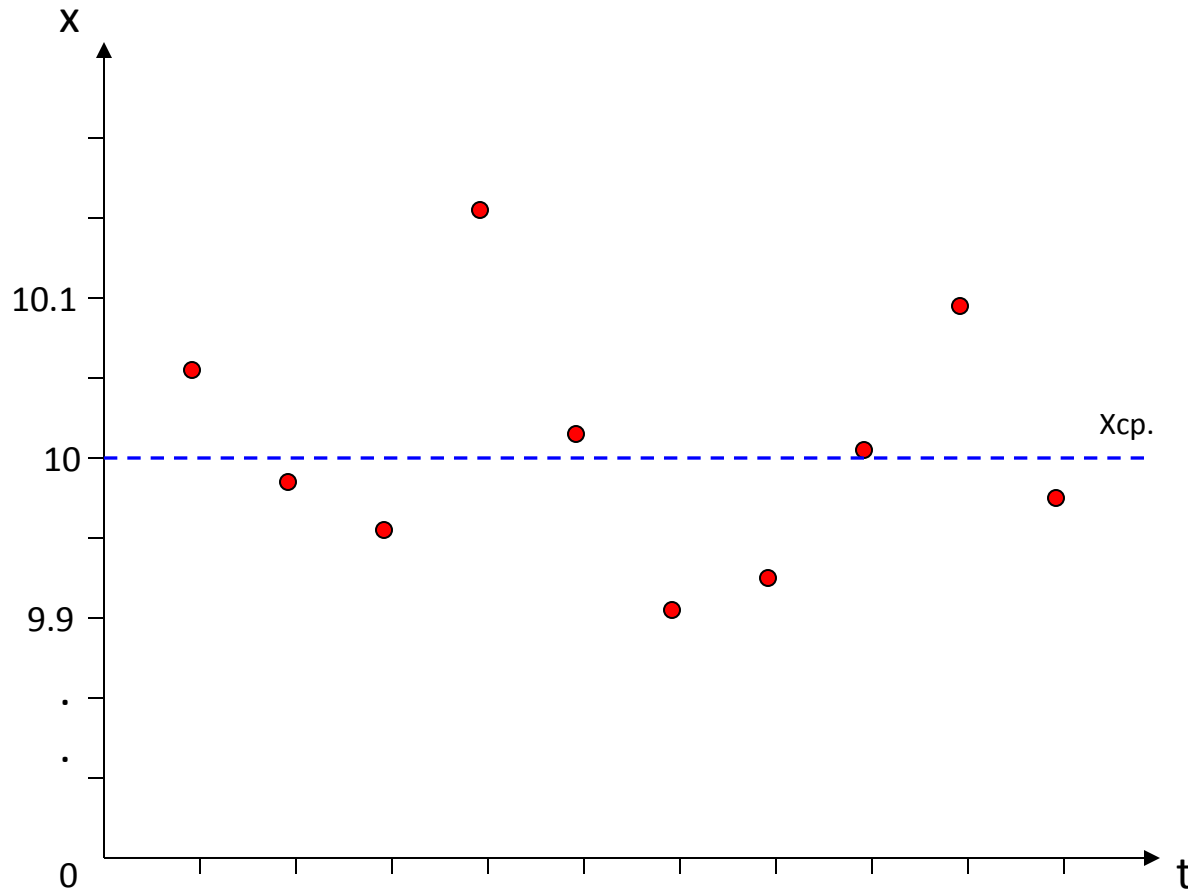
где z_p - коэффициент нормального закона распределения, зависящий от доверительной вероятности

$t_p(f)$ - коэффициент закона распределения Стьюдента, зависящий как от доверительной вероятности, так и от степени свободы $f = n - 1$



Последние формулы получены в предположении, что закон распределения погрешностей нормальный. При $n > 30$ коэффициенты нормального закона и закона Стьюдента становятся одинаковыми.

10.2. Пример обработки прямых многократных измерений сопротивления омметром



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x, кОм	10,06	9,98	9,95	10,15	10,02	9,90	9,92	10,01	10,1	9,97

10.2. Пример обработки прямых многократных измерений сопротивления омметром

1. Исключим систематическую погрешность из каждого наблюдения, т.е. получим исправленный ряд x_1, x_2, \dots, x_n

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10
9,90	9,92	9,95	9,97	9,98	10,01	10,02	10,06	10,1	10,15

2. Находим действительное значение измеряемой величины – среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \bar{x} = 10,006$$

3. Находим случайные отклонения результатов наблюдения по формуле

$$\rho_1 = x_1 - \bar{x}; \quad \rho_2 = x_2 - \bar{x}; \dots; \rho_n = x_n - \bar{x}$$

p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
-0,106	-0,086	-0,056	-0,036	-0,026	-0,004	0,014	0,054	0,094	0,144

4. Проверяем правильность нахождения \bar{x} используя свойство случайных отклонений

$$\sum_n \rho_i = 0; \quad (-0,106) + (-0,086) + (-0,056) + (-0,036) + (-0,026) + (-0,004) + 0,014 + 0,054 + 0,094 + 0,144 = 0$$

10.2. Пример обработки прямых многократных измерений сопротивления омметром

5. Находим оценку дисперсии исправленного ряда наблюдений, которая определяется по формуле

$$S^2[x] = \frac{1}{n-1} \sum_n \rho_i^2$$

$$S^2[x] = \frac{1}{10-1} ((-0,106)^2 + (-0,086)^2 + (-0,056)^2 + (-0,036)^2 + (-0,026)^2 + 0,004^2 + 0,014^2 + 0,054^2 + 0,094^2 + 0,144^2)$$

$$S^2[x] = 0,00528$$

6. Находим доверительный интервал погрешности измерения и записать результат измерения с доверительной вероятностью P в виде

$$x_{\text{и}} = x \pm t_p(f) \frac{S[x]}{\sqrt{n}}$$

при P=0,95

$$x_{\text{и}} = (10,006 \pm 0,051) \text{кОм}$$