

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Донбаська державна машинобудівна академія**

Автор І. П. Кутковий.

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРІВ

Конспект лекцій

Краматорськ 2012

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Донбаська державна машинобудівна академія**

І. П. Кутковий

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРІВ

Конспект лекцій

Рекомендовано до перезатвердження
кафедрою ЕСА

(назва кафедри)

Протокол № 34 від 11.06. 2012 р.

(протокол, номер, дата)

В.О Зав. кафедрою ЕСА

(назва кафедри)

_____ **О.М. Наливайко**

(підпис, ініціали, прізвище)

Краматорськ 2012

Предисловие

Предлагаемое методическое пособие включает в себя краткое, изложение основных разделов дисциплины, вопросы для самопроверки, контрольные задания и список литературы.

В результате изучения дисциплины «Метрология» студенты должны:

- ознакомиться с принципами действия, основными характеристиками и областями применения средств электрических измерений;
- освоить основные методы нормирования погрешностей средств измерений и уметь оценить погрешность результата измерений;
- уметь самостоятельно выбрать метод и средство измерения в зависимости от требуемой точности и условий проведения эксперимента.

Рекомендуемая литература

1. Основы метрологии и электрические измерения. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина – 6-е изд., переработ. и доп.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1987.- 480 с.

2. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учебн. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

3. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов /В.И. Нефёдов, В.И. Хахин, Е.В. Федорова и др.; Под ред. В.И. Нефёдова. – М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.

4. Э.Г. Атамаян. Приборы и методы измерения электрических величин: Учеб. пособие для студ. вузов. – 2 изд., перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 1989. – 384 с.

5. Тревис Дж. LabVIEW для всех/Пер с англ. Клушин Н.А. – М.:ДМК Пресс; ПриборКомплект,2005 – 544 с.

6. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В. LabVIEW: практикум по электронике и микропроцессорной технике: Учебное пособие для вузов. – М. ДМКПресс, 2005. -182 с.

Содержание

	стр.
Введение.....	4
I. Общие сведения о метрологии и измерении физических величин.....	4
II. Погрешности измерений.....	8
III. Измерительные преобразователи и интеллектуальные датчики.....	26
IV. Электромеханические и электронные аналоговые измерительные приборы.....	28
V. Измерительные мосты и компенсаторы постоянного и переменного тока.....	31
VI. Цифровые измерительные приборы.....	32
VII. Приборы для анализа сигналов.....	45
VIII. Виртуальные измерительные приборы.....	47
IX. Системы сбора и обработки измерительной информации.....	49
X. Основы стандартизации и сертификации.....	49
XI. Контрольные работы.....	51

Введение

Роль метрологии и технических средств измерений в развитии научно-технического прогресса. Краткий исторический обзор развития Метрологии и технических средств измерений [1: с.4 ... 9; 2: с.6...11; 3: с.7...12; 4: с.6...11].

I. Общие сведения о метрологии и измерении физических величин.

Содержание и основные задачи метрологии. Физические величины, системы единиц физических величин. Средства измерений. Измерительные преобразователи, меры, измерительные приборы и системы. Чувствительность и точность средств измерений. Определение измерения. Основные виды и методы измерений. [1: с.10...23, 36...39, 97...103,109...113; 2: с.12...22; 3: с. 13...22, 25...45; 4: с.19,20,23...35].

I.1. Основные сведения и методические указания.

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

Метрологию принято разделять на три области:

- **Теоретическую метрологию;**
- **Прикладную метрологию;**
- **Законодательную метрологию.**

Специалисты в области **теоретической метрологии** занимаются разработкой общей теории измерений, обоснованием единиц измерения физических величин и методами оценки точности измеряемых величин.

Специалисты в области **прикладной метрологии** занимаются разработкой, производством и оценкой метрологических характеристик средств измерений. Предметами прикладной метрологии являются:

1. Специалисты в области **законодательной метрологии** занимаются разработкой стандартов, и контролем за состоянием средств измерений.

Основные понятия метрологии

Физическая величина – есть свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них.

Единица физической величины – это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное 1.

Значение физической величины – оценка физической величины в принятых единицах измерения.

Мера – совокупность технических средств, служащих для вещественного воспроизведения единицы измерения с определенной, наперед заданной точностью.

Измерением называется экспериментальное определение значения физической величины путем сравнения этой величины с некоторой ее частью, принятой за единицу измерения.

Истинное значение измеряемой величины – значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Точность измеренного значения определяется как дискретностью представления единицы измерения, так и погрешностью ее реализации. Поэтому *истинное значение* измеряемой величины получить невозможно

принципиально, и это понятие заменяют понятием *действительного значения* измеряемой величины.

Действительное значение измеряемой величины - то максимально точное ее значение, которое может быть получено при данном уровне развития науки и техники.

Средствами измерения называют технические средства, используемые при осуществлении процесса измерения, и имеющие нормированные метрологические характеристики.

Погрешность измерения – отклонение измеренного значения от действительного значения измеряемой величины.

Единицы физических величин подразделяются на *основные* и *производные* и объединяются в соответствии с принятыми принципами в *системы единиц физических величин*. В России принят ГОСТ 8.417-81, утверждающий Международную систему единиц СИ (SI – Systeme International).

Виды и методы измерений.

Различают следующие виды измерений.

Прямые измерения. Прямые измерения характеризуются тем, что результат измерения получается непосредственно от использованного средства измерения.

Косвенные измерения. Косвенным называется способ измерения, когда результат измерения вычисляется экспериментатором по его функциональной зависимости от результата прямого измерения.

Совокупные измерения. Совокупным называется способ измерения, когда результат измерения вычисляется экспериментатором по его функциональной зависимости от нескольких результатов прямых измерений.

Пример совместного измерения: определяют зависимость сопротивления резистора от температуры $R_t=R_0(1+A \cdot t+B \cdot t^2)$; измеряя сопротивление резистора при трех различных температурах, составляют систему из трех уравнений, из которых находят параметры R_0 , A , B зависимости.

Измерительный процесс в явной или неявной форме содержит следующие составляющие:

- **Измеряемую величину.**
- **Средства измерения.**
- **Методы измерения.**

При этом под методом измерения понимается совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Различают следующие методы измерений.

1. **Метод непосредственной оценки.** При этом методе результат измерения определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора, шкала которого заранее была градуирована с помощью меры.

2. **Метод сравнения с мерой.**

а) Нулевой метод.

При нулевом методе сравнения с мерой, измерительный прибор сводится к устройству сравнения, индицирующему нулевую разницу между измеряемой величиной и используемой мерой. Результат измерения определяется значением меры.

Типичным примером использования такого метода являются обычные рычажные весы.

б) Дифференциальный метод.

Метод сравнения, при котором мера может быть не точно равна измеряемой величине. В этом случае разница между мерой и измеряемой величиной определяется методом непосредственной оценки. Результат измерения определяется суммой используемой меры и значения, полученного от прибора непосредственной оценки. Точность метода возрастает с уменьшением разницы между значениями меры и измеряемой величины.

Примером использования этого метода могут служить обычные торговые весы с дополнительным циферблатом.

в) Метод замещения.

Сущность метода сводится к тому, что измеряемая величина замещается воспроизводимой мерой таким образом, чтобы устройство сравнения находилось бы в том же состоянии. Результат измерения определяется значением используемой меры.

Примером этого метода является точное измерение малого напряжения с помощью гальванометра, к которому сначала подключают источник неизвестного напряжения и определяют отклонение указателя, а затем с помощью регулируемого источника известного напряжения добиваются того же отклонения указателя. При этом известное напряжение равно неизвестному.

д) Метод совпадения.

При методе совпадения ряд равномерно чередующихся отметок или сигналов, соответствующих измеряемой величине, сопоставляется с рядом отметок или сигналов, соответствующих воспроизводимой мере и наблюдается их совпадение, на основе которого определяется значение измеряемой величины.

При изучении данного раздела обратите внимание, что современный измерительный прибор, а тем более измерительная система представляет из себя, в общем случае, последовательность аналоговых измерительных преобразователей, в самом конце которой располагается устройство аналого-

цифрового преобразования, реализующее собственно измерение, т.е. формирование численного значения измеряемой величины.

I.2. Вопросы для самопроверки

1. Что такое Метрология, и какие области знаний она охватывает?
2. Что такое измерение, средства измерения и погрешность измерения?
3. Приведите основные единицы Международной системы единиц СИ.
4. Приведите численные значения и условные обозначения кратных и дольных значений единиц физических величин.
5. Какие виды измерений используются на практике?
6. Какие существуют методы измерений и в чем они заключаются?

II. Погрешности измерений

Источники погрешностей (инструментальные и методические погрешности, влияние помех, субъективные ошибки). Номинальная и реальная функция преобразования, абсолютная и относительная погрешность средства измерений, основная и дополнительная погрешности. Пределы допускаемых погрешностей, классы точности средств измерений. Выявление и уменьшение систематических погрешностей. Оценка случайных погрешностей. Доверительный интервал и доверительная вероятность. Оценка погрешностей косвенных измерений. Обработка результатов измерений. [1: с.23...35,40,41,53,54,56...61; 2: с.22...53; 3: с.48...91; 4: с.21,22,35...52,63...71, 72...77,85...93].

II.1. Основные сведения и методические указания.

Одним из основополагающих понятий Метрологии является понятие погрешности измерений.

Погрешностью измерения называют отклонение измеренного значения физической величины от её истинного значения.

Погрешность измерений, в общем случае, может быть вызвана следующими причинами:

1. Несовершенством принципа действия и недостаточным качеством элементов используемого средства измерения.
2. Несовершенством метода измерений и влиянием используемого средства измерения на саму измеряемую величину, зависящим от способа использования данного средства измерения.

3. Субъективными ошибками экспериментатора.

Так как истинное значение измеряемой величины никогда неизвестно (в противном случае отпадает необходимость в проведении измерений), то численное значение погрешности измерений может быть найдено только приближенно. Наиболее близким к истинному значению измеряемой величины является значение, которое может быть получено при использовании эталонных средств измерений (средств измерений наивысшей точности). Это значение условились называть **действительным** значением измеряемой величины. Действительное значение также является неточным, однако, из-за малой погрешности эталонных средств измерений, погрешностью определения действительного значения пренебрегают.

Классификация погрешностей

1. По форме представления различают понятия абсолютной погрешности измерений и относительной погрешности измерений.

Абсолютной погрешностью измерений называют разность между измеренным и действительным значениями измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_{д},$$

где Δ - абсолютная погрешность,

x – измеренное значение,

$x_{д}$ – действительное значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность имеет размерность измеряемой величины. Знак абсолютной погрешности будет положительным, если измеренное значение больше действительного, и отрицательным в противном случае.

Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{д}} \cdot 100\%.$$

где δ – относительная погрешность.

Чаще всего относительную погрешность определяют приближенно в процентах от измеренного значения:

$$\delta \approx \frac{\Delta}{x} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность показывает, какую часть (в %) от измеренного значения составляет абсолютная погрешность. Относительная погрешность позволяет нагляднее, чем абсолютная погрешность, судить о точности измеренного значения.

2. По источникам происхождения погрешности подразделяют на следующие виды:
- инструментальные погрешности;
 - методические погрешности;
 - субъективные погрешности, допущенные экспериментатором .

Инструментальными называются погрешности, которые принадлежат данному типу средств измерения, могут быть определены при их испытаниях и занесены в паспорт средства измерения в виде пределов допускаемых погрешностей.

Инструментальная погрешность возникает из-за несовершенства принципа действия и недостаточно высокого качества элементов, применяемых в конструкции средства измерений. По этой причине реальная передаточная характеристика каждого экземпляра средства измерений в большей или меньшей степени отличается от номинальной (расчетной) передаточной характеристики. Отличие реальной характеристики средства измерений от номинальной (рис.1) определяет величину инструментальной погрешности средства измерений.

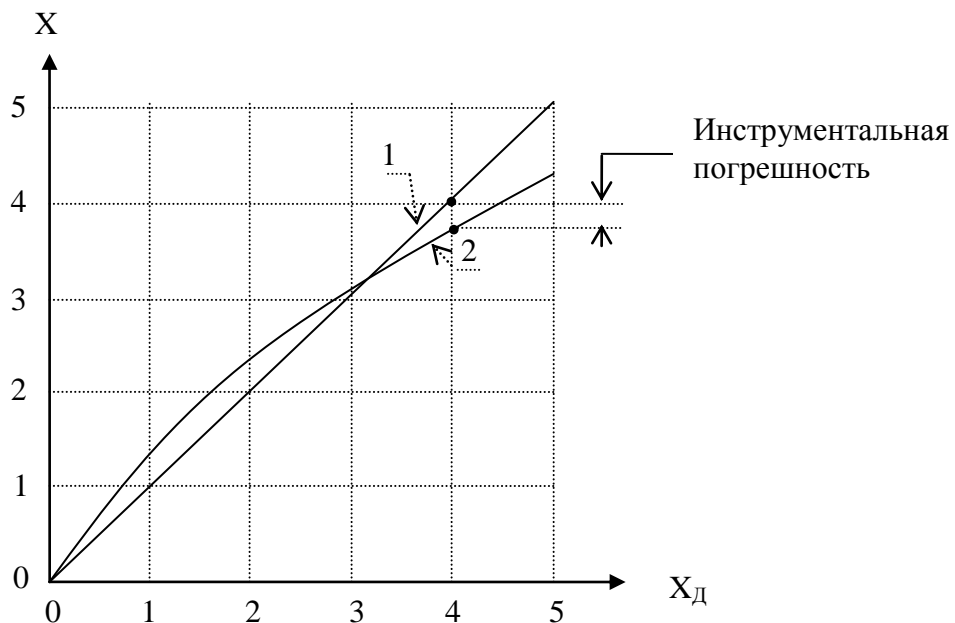


Рис.1. Иллюстрация к определению понятия инструментальной погрешности.

Здесь: 1 – номинальная характеристика средства измерений;
2 – реальная характеристика средства измерений.

Как видно из рис.1, при изменении измеряемой величины, инструментальная погрешность может иметь различные значения (как положительные, так и отрицательные).

При создании средств измерений какой-либо физической величины, к сожалению, не удается полностью избавиться от реакции этого средства измерений на изменение других (не измеряемых) величин. Наряду с чувствительностью средства измерения к измеряемой величине, оно всегда реагирует (хотя и существенно в меньшей степени) на изменение условий эксплуатации. По этой причине инструментальную погрешность подразделяют на **основную** погрешность и **дополнительную** погрешности.

Основной погрешностью называют погрешность, имеющую место в случае применения средства измерений в нормальных условиях эксплуатации.

Номенклатура влияющих на средство измерений величин и диапазоны их изменений определяются разработчиками в качестве нормальных условий для каждого типа средств измерений. Нормальные условия эксплуатации всегда указываются в техническом паспорте средства измерений. Если эксперимент выполняется в условиях, отличных от нормальных для данного средства измерений, его реальная характеристика искажается сильнее, чем в нормальных условиях. Погрешности, которые при этом возникают, называют дополнительными.

Дополнительной погрешностью называют погрешность средств измерений, которая возникает в условиях, отличающихся от нормальных, но входящих в допустимую рабочую область условий эксплуатации.

Рабочие условия эксплуатации, так же как и нормальные, в обязательном порядке приводятся в техническом паспорте средств измерений.

Инструментальная погрешность средств измерений определенного типа не должна превышать некоторого заданного значения – так называемой предельно допустимой основной погрешности средств измерений данного типа. Фактическая основная погрешность каждого конкретного экземпляра этого типа является при этом случайной величиной и может принимать различные значения, иногда даже равные нулю, но в любом случае инструментальная погрешность не должна превышать заданного предельного значения. Если это условие не выполняется, средство измерений должно быть изъято из обращения.

Методическими называются погрешности, которые возникают из-за неудачного выбора экспериментатором средства измерения для решения поставленной задачи. Они не могут быть приписаны средству измерения и приведены в его паспорте.

Методические погрешности измерения зависят как от характеристик применяемого средства измерений, так и во многом от параметров самого объекта измерения. Неудачно выбранные средства измерений могут исказить состояние объекта измерений. При этом методическая составляющая погрешности может оказаться существенно больше инструментальной.

Субъективными погрешностями называют погрешности, допускаемые самим экспериментатором при проведении измерений.

Этот тип погрешностей связан обычно с невнимательностью экспериментатора: применение прибора без устранения смещения нуля, неправильное определение цены деления шкалы, неточный отсчет доли деления, ошибки в подключении и т.п.

3. По характеру проявления погрешности измерений подразделяют на:
- систематические погрешности;
 - случайные погрешности;
 - промахи (грубые ошибки).

Систематической называют погрешность, которая при повторных измерениях одной и той же величины остается постоянной, или изменяется закономерно.

Систематические погрешности обусловлены как несовершенством метода измерений и влиянием средства измерений на измеряемый объект, так и отклонением реальной передаточной характеристики применяемого средства измерений от номинальной характеристики.

Постоянные систематические погрешности средств измерений могут быть выявлены и численно определены в результате сличения их показаний с показаниями эталонных средств измерений. Такие систематические погрешности могут быть уменьшены регулировкой приборов или введением соответствующих поправок. Следует заметить, что полностью исключить систематические погрешности средств измерений не удастся, так как их реальные передаточные характеристики изменяются при изменении условий эксплуатации. Кроме этого всегда имеют место так называемые прогрессирующие погрешности (возрастающие или убывающие), вызванные старением элементов входящих в состав средств измерений. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы регулировкой или введением поправок лишь на некоторое время.

Таким образом, даже после регулировки или введения поправок, всегда имеет место так называемая неисключенная систематическая погрешность результата измерений.

Случайной называют погрешность, которая при повторных измерениях одной и той же величины принимает различные значения.

Случайные погрешности обусловлены хаотичным характером изменений физических величин (помех), влияющих на передаточную характеристику средства измерений, суммированием помех с измеряемой величиной, а также наличием собственных шумов средства измерений. При создании средств измерений предусматриваются специальные меры защиты от помех: экранирование входных цепей, использование фильтров, применение стабилизированных источников питающего напряжения и т.д. Это позволяет уменьшить величину случайных погрешностей при проведении измерений. Как правило, при повторных измерениях одной и той же величины результаты измерений либо совпадают, либо отличаются на одну, две единицы младшего разряда. В такой ситуации случайной погрешностью пренебрегают и оценивают только величину неисключенной систематической погрешности.

Наиболее сильно случайные погрешности проявляются при измерении малых значений физических величин. Для повышения точности в таких случаях производятся многократные измерения с последующей статистической обработкой результатов методами теории вероятности и математической статистики.

Промахами называют грубые погрешности, существенно превышающие ожидаемые погрешности при данных условиях проведения измерений.

Промахи большей частью возникают из-за субъективных ошибок экспериментатора или из-за сбоев в работе средства измерений при резких изменениях условий эксплуатации (броски или провалы сетевого напряжения, грозовые разряды и т.п.) Обычно промахи легко выявляются при повторных измерениях и исключаются из рассмотрения.

Оценка погрешностей косвенных измерений.

При косвенных измерениях результат измерений определяется по функциональной зависимости от результатов прямых измерений. Поэтому погрешность косвенных измерений определяется как полный дифференциал этой функции от величин, измеряемых с помощью прямых измерений.

$$\Delta_y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta_{x_i}; \quad \delta_y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f(x_i) \right| \cdot x_i \cdot \delta_{x_i}$$

Где: Δ_{x_i} - предельные абсолютные погрешности результатов прямых измерений;

Δ_y - предельная абсолютная погрешность результата косвенного измерения;

δ_{x_i}, δ_y - соответствующие предельные относительные погрешности.
 $f(x_i)$ - функциональная связь между искомой измеряемой величиной и величинами, подвергающимися прямым измерениям.

Статистическая обработка результатов измерений

Из-за влияния на средство измерений помех различного происхождения (изменение температуры окружающей среды, электромагнитных полей, вибраций, изменения частоты и амплитуды сетевого напряжения, изменения атмосферного давления, влажности и т.д.), а также из-за наличия собственных шумов элементов, входящих в состав измерительных приборов, результаты повторных измерений одной и той же физической величины (особенно ее малых значений) будут в большей или меньшей степени отличаться друг от друга. В этом случае результат измерений является случайной величиной, которая характеризуется наиболее вероятным значением и разбросом (рассеянием) результатов повторных измерений вблизи наиболее вероятного значения. Если при повторных измерениях одной и той же величины результаты измерений не отличаются друг от друга, то это означает, что разрешающая способность отсчетного устройства не позволяет обнаружить это явление. В этом случае случайная составляющая погрешности измерений является несущественной и ею можно пренебречь. При этом неисключенную систематическую погрешность результата измерений оценивают по величине пределов допускаемых погрешностей применяемых средств измерений. Если же при повторных измерениях одной и той же величины наблюдается разброс показаний, то это означает, что наряду с большей или меньшей неисключенной систематической погрешностью, имеет место и случайная погрешность, принимающая при повторных измерениях различные значения.

Для определения наиболее вероятного значения измеряемой величины при наличии случайных погрешностей и для оценки погрешности, с которой определено это наиболее вероятное значение, применяется статистическая обработка результатов измерений. Статистическая обработка результатов серии измерений при проведении экспериментов позволяет решить следующие задачи.

1. Более точно определить результат измерения путем усреднения отдельных наблюдений.
2. Оценить область неопределенности уточненного результата измерений.

Основной смысл усреднения результатов измерений заключается в том, что найденная усредненная оценка имеет меньшую случайную погрешность, чем отдельные результаты, по которым эта усредненная оценка определяется. Следовательно усреднение не устраняет полностью случайного характера

усредненного результата, а лишь уменьшает ширину полосы его неопределенности.

Таким образом, при статистической обработке, прежде всего, определяют наиболее вероятное значение измеряемой величины путем вычисления среднего арифметического всех отсчетов:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где: x_i – результат i – го измерения;

n – число проведенных измерений в данной серии измерений.

После этого оценивают отклонение результатов отдельных измерений x_i от этой оценки среднего значения \bar{x} ; $\Delta_i = x_i - \bar{x}$.

Затем находят оценку среднеквадратического отклонения σ наблюдений, характеризующую степень рассеяния результатов отдельных наблюдений вблизи \bar{x} , по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}$$

Точность оценки наиболее вероятного значения измеряемой величины \bar{x} зависит от числа наблюдений n . Нетрудно убедиться в том, что результаты нескольких оценок \bar{x} по одному и тому же числу n отдельных измерений будут отличаться. Таким образом, сама оценка \bar{x} также является случайной величиной. В связи с этим вычисляется оценка среднеквадратического отклонения результата измерения \bar{x} , которую обозначают $\sigma_{\bar{x}}$. Эта оценка характеризует степень разброса значений \bar{x} по отношению к истинному значению результата, т.е. характеризует точность результата, полученного усреднением результата многократных измерений. Следовательно, по $\sigma_{\bar{x}}$ может быть оценена систематическая составляющая результата серии измерений. Для различных n она определяется по формуле:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Следовательно, точность результата многократных измерений увеличивается с ростом числа последних.

Однако в большинстве практических случаев нам важно определить не просто степень рассеивания значения погрешности при проведении серии измерений (т.е. величину $\sigma_{\bar{x}}$), а оценить вероятность возникновения погрешности измерения, не превышающую допустимую, т.е. не выходящую за пределы некоторого заданного интервала разброса получаемых погрешностей.

Доверительным интервалом $\pm \Delta_r$ называют интервал, который с заданной вероятностью, называемой **доверительной вероятностью** P_d накрывает истинное значение измеряемой величины.

При определении доверительных интервалов необходимо, прежде всего, учитывать, что закон распределения погрешностей, получаемых при проведении многократных измерений, при числе измерений в серии меньше 30, описывается не нормальным законом распределения, а так называемым законом распределения Стьюдента. И, в этих случаях, величину доверительного интервала обычно оценивают по формуле:

$$\Delta_r = t(P_d, n) \cdot \sigma_x,$$

где $t(P_d, n)$ - так называемый коэффициент Стьюдента.

В табл.4.1 приведены значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$ в зависимости от заданной доверительной вероятности и числа проведенных наблюдений n . При выполнении измерений обычно задаются доверительной вероятностью 0,95 или 0,99.

Таблица 4.1
Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$.

n	P_d							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,82	1,06	1,34	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
4	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,62	3,37	4,03
7	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
9	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
16	0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
25	0,69	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

При изучении материалов данного раздела следует хорошо уяснить, что погрешности результатов измерений и погрешности средств измерений – не идентичные понятия. Погрешность средства измерения это его свойство, характеристика, для описания которого используют ряд правил, закрепленных в стандартах и нормативных документах. Это та доля погрешности измерения, которая определяется только самим средством измерения. Погрешность же измерений (результата измерений) – это число, которое характеризует границы неопределенности значения измеряемой величины. В нее, кроме погрешности средства измерений, могут входить составляющие погрешности, порожденные применяемым методом измерения (методические погрешности), действием влияющих (неизмеряемых) величин, погрешность отсчета и др.

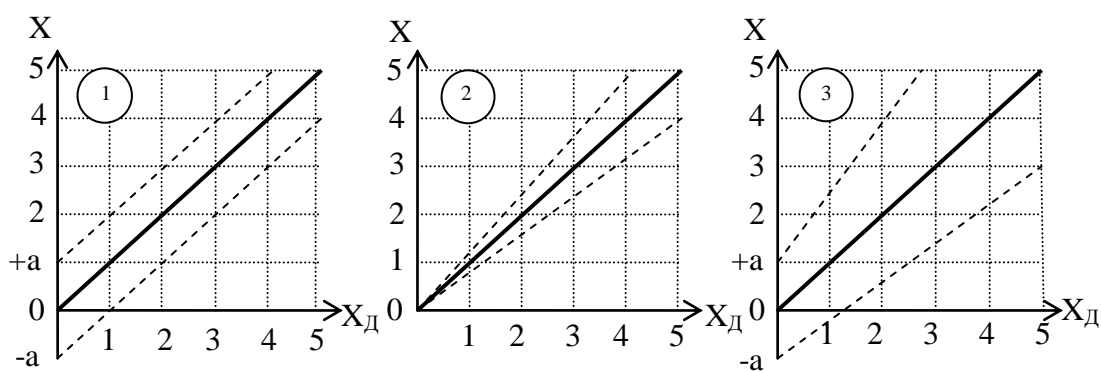
Нормирование погрешностей средств измерения.

Точность СИ определяется предельно-допустимыми погрешностями, которые могут быть получены при его использовании.

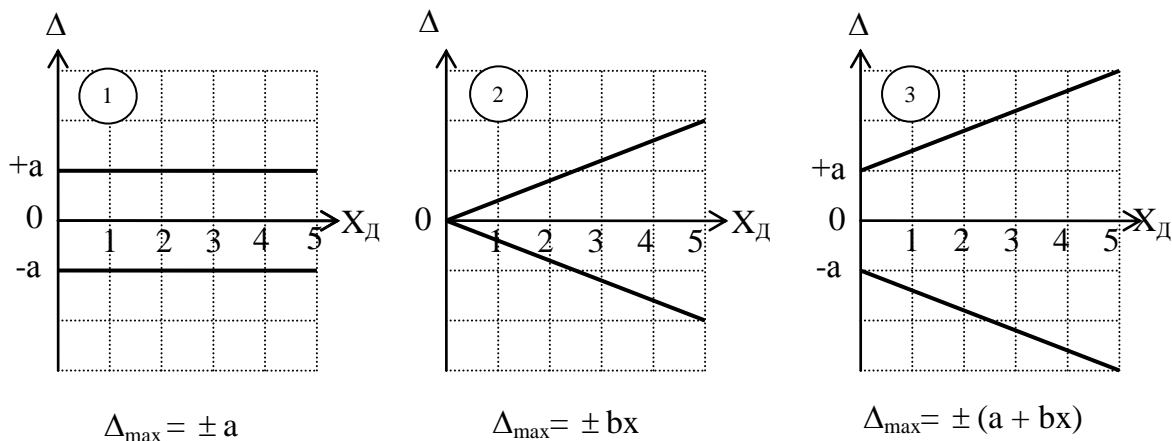
Нормированием погрешностей средств измерений называют процедуру назначения допустимых границ основной и дополнительных погрешностей, а также выбор формы указания этих границ в нормативно-технической документации.

Пределы допускаемой основной и дополнительных погрешностей определяются разработчиками для каждого типа средств измерений на стадии подготовки производства. В зависимости от назначения средства измерений и характера изменения погрешности в пределах диапазона измерений нормируется для средств измерений различного типа либо предельно-допустимое значение основной абсолютной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной приведенной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной относительной погрешности.

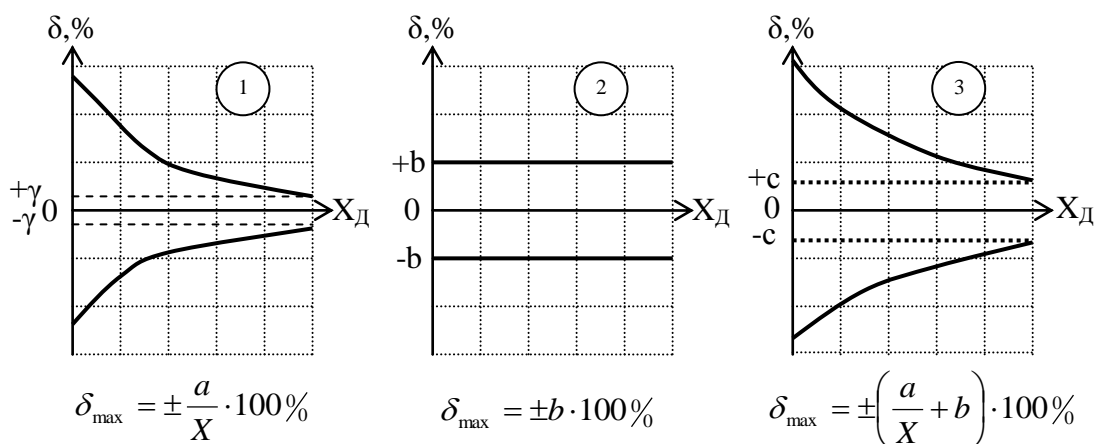
Для каждого типа средств измерений характер изменения погрешности в пределах диапазона измерений зависит от принципа действия этого средства измерений и может быть самым разнообразным. Однако, как показала практика, среди этого многообразия часто удается выделить три типовых случая, предопределяющих выбор формы представления пределов допускаемой погрешности. Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики и соответствующие им графики изменения предельных значений абсолютной и относительной погрешностей в зависимости от измеряемой величины приведены на рис 2.



а) Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики.



б) Пределы допускаемой абсолютной погрешности.



в) Пределы допускаемой относительной погрешности.

Рис. 2. Иллюстрации к выбору формы представления пределов допускаемой основной погрешности.

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной (1-й график на рис.2а), абсолютная погрешность, возникающая при этом, (1-й график на рис.2б), не зависит от измеряемой величины.

Составляющую погрешности средства измерений, не зависящую от измеряемой величины, называют аддитивной погрешностью.

Если угол наклона реальной передаточной характеристики средства измерений отличается от номинального (2-й график на рис. 2а), то абсолютная

погрешность будет линейно зависеть от измеряемой величины (2-й график на рис. 2б).

Составляющую погрешности средства измерений, линейно зависящую от измеряемой величины, называют мультипликативной погрешностью.

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной и угол ее наклона отличается от номинального (3-й график на рис. 2а), то в этом случае имеет место как аддитивная, так и мультипликативная погрешность.

Аддитивная погрешность возникает из-за неточной установки нулевого значения перед началом измерений, ухода нуля в процессе измерений, из-за наличия трений в опорах измерительного механизма, из-за наличия термо-эдс в контактных соединениях и т.д.

Мультипликативная погрешность возникает при изменении коэффициентов усиления или ослабления входных сигналов (например, при изменении температуры окружающей среды, или вследствие старения элементов), из-за изменения значений, воспроизводимых мерами, встроенными в измерительные приборы, из-за изменений жесткости пружин, создающих противодействующий момент в электромеханических приборах и т.д.

Ширина полосы неопределенности значений абсолютной (рис.2б) и относительной (рис.2в) погрешностей характеризует разброс и изменение в процессе эксплуатации индивидуальных характеристик множества находящихся в обращении средств измерений определенного типа.

А) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью (1-й график на рис.2) удобно нормировать одним числом предельно-допустимое значение абсолютной погрешности ($\Delta_{\max} = \pm a$). В этом случае фактическая абсолютная погрешность Δ каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно-допустимой величины ($\Delta \leq \pm a$). В многопредельных измерительных приборах с преобладающей аддитивной погрешностью для каждого предела измерений пришлось бы указывать свое значение предельно допустимой абсолютной погрешности. К сожалению, как видно из 1-го графика на рис.2в, нормировать одним числом предел допускаемой относительной погрешности в различных точках шкалы не представляется возможным. По этой причине для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью часто нормируют одним числом значение так называемой основной приведенной относительной погрешности

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{\max}}{X_N} \cdot 100\% = \pm \frac{a}{X_N} \cdot 100\%,$$

где X_N – нормирующее значение.

Таким способом, например, нормируются погрешности большинства электромеханических и электронных приборов со стрелочными индикаторами. В качестве нормирующего значения X_N обычно используется предел измерений ($X_N = X_{\max}$), удвоенное значение предела измерений (если нулевая отметка находится в середине шкалы), или длина шкалы (для приборов с неравномерной шкалой). Если $X_N = X_{\max}$, то значение приведенной погрешности γ равно пределу допускаемой относительной погрешности средства измерений в точке, соответствующей пределу измерений. По заданному значению предела допускаемой основной приведенной погрешности легко определить предел допускаемой основной абсолютной погрешности для каждого предела измерений многопредельного прибора: $\Delta_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot X_{\max}}{100}$.

После этого для любой отметки шкалы X может быть произведена оценка предельно-допустимой основной относительной погрешности:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_{\max}}{X} \cdot 100\% = \pm \gamma \frac{X_{\max}}{X}.$$

Б) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.

Как видно из рис.2 (2-й график), для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью, одним числом удобно нормировать предел допускаемой основной относительной погрешности (рис.2в) $\delta_{\max} = \pm b \cdot 100\%$. В этом случае, фактическая относительная погрешность каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно допустимой величины ($\delta \leq \pm b \cdot 100\%$). По заданному значению предельно допустимой относительной погрешности δ_{\max} для любой точки шкалы может быть произведена оценка предельно-допустимой абсолютной погрешности:

$$\Delta \leq \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100\%} = \pm b \cdot X.$$

К числу средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью относится большинство многозначных мер, счетчики электрической энергии, счетчики воды, расходомеры и др. Следует отметить, что для реальных средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью не удастся полностью устранить аддитивную погрешность. По этой причине в технической документации всегда указывается наименьшее значение измеряемой величины, для которого предел допускаемой основной относительной погрешности ещё не превышает заданного значения δ_{\max} . Ниже

этого наименьшего значения измеряемой величины погрешность измерений не нормируется и является неопределенной.

В) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с соизмеримой аддитивной и мультипликативной погрешностью.

Если аддитивная и мультипликативная составляющая погрешности средства измерений соизмеримы (3-й график на рис.2), то задание предельно-допустимой погрешности одним числом не представляется возможным. В этом случае либо нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности (указываются предельно-допустимые значения a и b), либо (чаще всего) нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности. В последнем случае численные значения предельно-допустимых относительных погрешностей в различных точках шкалы оцениваются по формуле:

$$\delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right],$$

где X_{\max} – предел измерений;

X - измеренное значение;

$d = \frac{a}{X_{\max}} \cdot 100\%$ - значение приведенной к пределу измерений аддитивной составляющей основной погрешности;

$c = \left(b + \frac{a}{X_{\max}} \right) \cdot 100\%$ - значение результирующей относительной основной погрешности в точке, соответствующей пределу измерений.

Рассмотренным выше способом (указанием численных значений c и d) нормируются, в частности, предельно-допустимые значения относительной основной погрешности цифровых измерительных приборов. В этом случае относительные погрешности каждого экземпляра средств измерений определенного типа не должны превышать установленных для этого типа средств измерений значений предельно-допустимой погрешности:

$$\delta \leq \delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right].$$

При этом абсолютная основная погрешность определяется по формуле

$$\Delta \leq \Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100}.$$

Г) Нормирование дополнительных погрешностей.

Наиболее часто пределы допускаемых дополнительных погрешностей указывают в технической документации либо одним значением для всей рабочей области величины, влияющей на точность средства измерений (иногда несколькими значениями для поддиапазонов рабочей области влияющей величины), либо отношением предела допускаемой дополнительной погрешности к интервалу значений влияющей величины. Пределы допускаемых дополнительных погрешностей указываются на каждой , влияющей на точность средства измерений величине. При этом, как правило, значения дополнительных погрешностей устанавливаются в виде долевого или кратного значения предела допускаемой основной погрешности. Например, в документации может быть указано, что при температуре окружающей среды за пределами нормальной области температур, предел допускаемой дополнительной погрешности, возникающей по этой причине, не должен превышать $\pm 0,2\%$ на 10°C .

Классы точности средств измерений.

Исторически по точности средства измерений подразделяют на классы. Иногда их называют классами точности, иногда классами допуска, иногда просто классами.

Класс точности средства измерений – это его характеристика, отражающая точностные возможности средств измерений данного типа.

Допускается буквенное или числовое обозначение классов точности. Средствам измерений, предназначенным для измерения двух и более физических величин, допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины. Средствам измерений с двумя или более переключаемыми диапазонами измерений также допускается присваивать два или более класса точности.

Если нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности, или в различных поддиапазонах измерений установлены разные значения пределов допускаемой относительной основной погрешности, то , как правило, применяется буквенное обозначение классов. Так, например платиновые термометры сопротивления изготавливают с классом допуска **A** или классом допуска **B**. При этом для класса **A** установлен предел допускаемой абсолютной основной погрешности $\Delta_{\max} = (0,15 + 0,001 \cdot t_x)$, а для класса **B** - $\Delta_{\max} = \pm(0,3 + 0,005 \cdot t_x)$, где t_x – температура измеряемой среды.

Если для средств измерений того или иного типа нормируется одно значение предельно-допустимой приведенной основной погрешности, или одно значение предельно-допустимой относительной основной погрешности, или

указываются значения **c** и **d**, то для обозначения классов точности используются десятичные числа. В соответствии с ГОСТом 8.401-80 для обозначения классов точности допускается применение следующих чисел: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где $n = 0, -1, -2$, и т.д.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью численное значение класса точности выбирается из указанного ряда равным предельно-допустимому значению приведенной основной погрешности, выраженной в процентах. Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью численное значение класса точности соответствует пределу допускаемой относительной основной погрешности также выраженной в процентах. Для средств измерений с соизмеримыми аддитивными и мультипликативными погрешностями числа **c** и **d** также выбираются из указанного выше ряда. При этом класс точности средства измерений обозначается двумя числами, разделенными косой чертой, например, 0,05/0,02. В этом случае $c = 0,05\%$; $d = 0,02\%$. Примеры обозначений классов точности в документации и на средствах измерений, а также расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности приведены в Таблице 1.

Правила округления и записи результата измерений.

Нормирование пределов допускаемых погрешностей средств измерений производится указанием значения погрешностей с одной или двумя значащими цифрами. По этой причине при расчете значений погрешностей измерений также должны быть оставлены только первые одна или две значащие цифры. Для округления используются следующие правила:

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них не более 2, и одной цифрой, если первая из них 3 и более.
2. Показание прибора округляется до того же десятичного разряда, которым заканчивается округленное значение абсолютной погрешности.
3. Округление производится в окончательном ответе, промежуточные вычисления выполняют с одной – двумя избыточными цифрами.

Пример 1:

- показание прибора - 5,361 В;
- вычисленное значение абсолютной погрешности - $\pm 0,264$ В;
- округленное значение абсолютной погрешности - $\pm 0,26$ В;
- результат измерения - $(5,36 \pm 0,26)$ В.

Таблица 1

Примеры обозначения классов точности средств измерений и расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности.

Форма представления нормируемой основной погрешности	Примеры обозначения класса точности		Расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности	Примечания
	В документации	На средствах измерений		
Нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности	Варианты: - класс В ; - класс допуска В ; - класс точности В .	В	$\Delta_{\max} = \pm a \quad \text{или} \quad \Delta_{\max} = \pm(a + bx)$ $\delta_{\max} = \pm \frac{a}{x} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \delta_{\max} = \pm \left(\frac{a}{x} + b \right) \cdot 100\%$	Значения а и в приводятся в документации на средство измерений.
Нормируется предел допускаемой приведенной основной погрешности	Варианты: - класс точности 1,5 - не обозначается.	1,5	$\Delta_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot x_{\max}}{100}, \quad \gamma = 1,5\%$ $\delta_{\max} = \pm \gamma \cdot \frac{x_{\max}}{x}, \quad \text{где } x_{\max} \text{ – предел измерений.}$	Для приборов с равномерной шкалой и нулевой отметкой в начале шкалы
	Варианты: - класс точности 2,5; - не обозначается	2,5	$\Delta_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot L}{100}, \quad \gamma = 2,5\%$ $\Delta_{\max} \text{ - предел допускаемой абсолютной погрешности в мм.}$ $L \text{ - длина всей шкалы.}$	Для приборов с неравномерной шкалой. Длина шкалы указывается в документации.
Нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности	Класс точности 0,5.	0,5	$\delta_{\max} = \pm b \cdot 100\% = \pm 0,5\%$ $\Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.
	Варианты: - класс точности 0,02/0,01; - не обозначается.	0,02/0,01	$\delta_{\max} = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{x_{\max}}{x} - 1 \right) \right] \%$ $\Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с соизмеримыми аддитивной и мультипликативной погрешностью

Пример 2:

- показание прибора – 35,67 мА;
- вычисленное значение абсолютной погрешности - $\pm 0,541$ мА;
- округленное значение абсолютной погрешности - $\pm 0,5$ мА;
- результат измерений – $(35,7 \pm 0,5)$ мА.

Пример 3:

- вычисленное значение относительной погрешности – $\pm 1,268$ %;
- округленное значение относительной погрешности – $\pm 1,3$ %.

Пример 4:

- вычисленное значение относительной погрешности - $\pm 0,367$ %;
- округленное значение относительной погрешности - $\pm 0,4$ %.

II.2. Вопросы для самопроверки

1. Чем вызываются погрешности измерений?
2. Перечислите разновидности погрешностей, возникающих в процессе измерений?
3. Какая разница между абсолютной, относительной и приведенной погрешностями измерения и в чем смысл их введения?
4. Чем отличается основная погрешность измерения от дополнительной?
5. Чем отличается методическая погрешность измерения от инструментальной?
6. Чем отличается систематическая погрешность измерения от случайной?
7. Что понимается под аддитивной и мультипликативной оставляющими погрешности?
8. В каких случаях целесообразно использовать статистическую обработку результатов измерений?
9. Какие статистические характеристики обработки наиболее часто используются на практике?
10. Как оценивается неисключенная систематическая погрешность при статистической обработке результатов измерений?
11. Что характеризует величина среднеквадратического отклонения ?
12. В чем заключается суть понятий «доверительной вероятности» и «доверительного интервала», используемых при статистической обработке результатов измерений?
13. В чем заключается разность понятий «погрешность измерения» и «погрешность средства измерения»?

III. Измерительные преобразователи и интеллектуальные датчики.

Первичные преобразователи температуры, давления, расхода, перемещений, скорости, ускорения, магнитных величин. Вторичные

измерительные преобразователи. Их назначение и основные характеристики. [1: с.44,45,101,103,164...169,289...314; 2 с.133...143].

III.1. Основные сведения и методические указания.

В подавляющем числе случаев, любое измерительное устройство состоит из цепочки аналоговых измерительных преобразователей физических величин из одного вида в другой, заканчивающейся блоком того или другого вида, преобразующего конечную аналоговую физическую величину в ее цифровое значение. Вид аналоговой физической величины, после последнего аналогового преобразования, определяется техническим удобством ее преобразования в цифровую форму. В общем случае:

измерительным преобразователем называется аналоговый преобразователь одной физической величины в другую, обладающий нормированными метрологическими характеристиками.

Следовательно, для любого измерительного преобразователя должно указываться предельное значение погрешности, которое данный измерительный преобразователь может внести в измерительную цепь.

Принято различать несколько типов аналоговых измерительных преобразователей, в зависимости от того назначения, которое они имеют в измерительной цепи.

Первичный преобразователь (датчик, сенсор) – измерительный преобразователь, на который воздействует измеряемая величина, т.е. он является первым в измерительной цепи. Выделяют, при этом, измерительные преобразователи электрических величин и измерительные преобразователи неэлектрических величин. Примером последних является термопара в цепи термоэлектрического термометра.

Вторичные преобразователи, подключаемые к измерительной цепи после первичного преобразователя, которые служат либо для масштабирования измеряемой величины (усилители, делители), либо для ее линеаризации, либо для дистанционной передачи измерительного сигнала (модуляторы, демодуляторы), либо просто для преобразования входной величины в ту физическую величину, для которой наиболее просто получить числовое значение.

Интеллектуальными называют те датчики, которые, кроме преобразования рода физической величины, осуществляют и некоторую предварительную обработку измеряемой информации.

III.2. Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение первичных измерительных преобразователей?
2. Каково отличие измерительных преобразователей от любых других преобразователей физических величин?

3. Назовите наиболее часто используемые выходные физические величины первичных преобразователей.
4. Поясните различие между терминами «Измерительный прибор» и «Измерительный преобразователь».
5. Какие типы измерительных преобразователей используются в измерительной технике?
6. Какие характеристики измерительных преобразователей являются наиболее важными?
7. Какие датчики называют интеллектуальными?

IV. Электромеханические и электронные аналоговые измерительные приборы

Магнитоэлектрические мультиметры. Электронные вольтметры переменного тока. Принципы построения и функционирования. Методы расширения пределов измерения в мультиметрах. [1: с.113...128, 147...161; 2: с.68...74, 81...84; 3: с. 128...140; 4: с.94...111, 123...136].

IV.1. Основные сведения и методические указания.

В данной теме изучаются принципы и особенности работы наиболее распространенных средств измерения – аналоговых электромеханических и электронных измерительных приборов.

Аналоговые измерительные устройства - есть устройства, отображающие значение измеряемой величины в виде положения (состояния) некоторого механического или оптического индикатора (стрелки, уровня, оптического пятна и т.п.).

Аналоговыми измерительными устройствами называются устройства, в которых численное значение измеряемой величины определяется человеком путем соотношения положения некоторого указателя (стрелки, уровня индикаторного столбика и пр.) с многозначной мерой (шкалой прибора).

В аналоговых измерительных устройствах численное значение измеряемой величины определяется экспериментатором (наблюдателем) путем сравнения положения индикатора с многозначной мерой – шкалой прибора или устройства. Поэтому, по сути дела, аналоговые измерительные устройства представляют собой последовательность измерительных (т.е. нормированных с точки зрения вводимых ими погрешностей) преобразователей измеряемой

величины в физическую величину, наиболее удобную для реализации многозначной меры. Поскольку численное значение измеряемой величины, в конечном счете, устанавливается человеком, то эта многозначная мера должна быть удобна и для человека.

Несмотря на все более расширяющееся применение цифровых измерительных устройств, аналоговые измерительные устройства, благодаря своей дешевизне и надежности до сих пор играют огромную роль в практической деятельности человека.

В настоящее время измерение даже неэлектрических величин стараются осуществлять путем предварительного преобразования неэлектрической величины в электрическую, поскольку, большей частью, измерение электрических величин производится быстрее, проще и дешевле. Поэтому электроизмерительные устройства и системы занимают особое место в метрологической практике. Аналоговые электроизмерительные устройства принято подразделять на:

- **Электромеханические измерительные устройства;**
- **Электронные измерительные устройства.**

Электромеханические измерительные устройства

Обобщенная структурная схема электромеханических измерительных устройств непосредственной оценки приведена на рисунке IV.1.

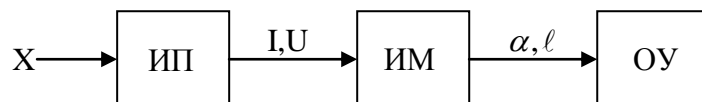


Рис.IV.1. Обобщенная структурная схема аналогового электро-механического измерительного устройства.

Здесь: X – измеряемая величина

ИП – измерительный преобразователь

ИМ – измерительный механизм

ОУ – отсчетное устройство

I,U – электрический ток или напряжение

α, ℓ - угол отклонения или расстояние перемещения указателя

Измерительный преобразователь служит для преобразования измеряемой величины в электрический ток или, что значительно реже, в электрическое напряжение. Измерительный механизм является также измерительным преобразователем и служит для преобразования электрического тока или напряжения в угол отклонения или расстояние перемещения указателя отсчетного устройства. Отсчетное устройство представляет собой многозначную меру, сравнением с которой положения указателя отсчетного

устройства, экспериментатор определяет значение измеряемой величины в соответствующих единицах.

В аналоговых электромеханических измерительных устройствах, на практике, наиболее широко используются измерительные механизмы следующего типа:

- **Магнитоэлектрический**
- **Электромагнитный**
- **Электродинамический**
- **Электростатический**
- **Индукционный**

В *магнитоэлектрическом* измерительном механизме, вращающий момент создается взаимодействием электромагнитного поля подвижной катушки по которой протекает входной ток, с полем постоянного магнита, в котором она вращается. Этот вращающий момент уравнивается противодействующим моментом, который создает специальная спиральная пружина, препятствующая вращению катушки. Поэтому угол отклонения катушки в магнитном поле постоянного магнита зависит от вращающего момента катушки a , следовательно, и от силы входного тока.

Указатель отсчетного устройства жестко связан с подвижной катушкой i , поэтому положение указателя пропорционально входному току.

Шкала отсчетного устройства является многозначной мерой, и экспериментатор определяет числовое значение измеряемой величины по совпадению положения указателя с соответствующим значением меры.

Электронные измерительные устройства.

Электронные измерительные устройства отличаются тем, что перед электромеханическим измерительным механизмом, измерительный преобразователь представляет собой сложный электронный блок, основную часть которого представляет электронный усилитель с большим коэффициентом усиления. Благодаря этому электронные измерительные приборы в отличие от электромеханических обладают гораздо большей чувствительностью и высоким входным сопротивлением. Однако на выходе используемого усилителя подключается обычный электроизмерительный механизм, как правило, магнитоэлектрического типа, с соответствующим отсчетным устройством.

IV.2. Вопросы для самопроверки.

1. Из каких основных узлов состоит электромеханический измерительный механизм?

2. Каким образом в электромеханическом измерительном механизме создается противодействующий момент и для какой цели он необходим?
3. В каких значениях переменного напряжения (мгновенных, амплитудных, среднеквадратических или иных) градуируют шкалы вольтметров переменного тока?
4. В чем состоит отличие аналоговых вольтметров электронного типа от электромеханических?
5. Как обеспечивается расширение предела измерения в N раз у амперметров?
6. Как обеспечивается расширение предела измерения в N раз у вольтметров?
7. Как в мультиметрах осуществляется преобразование напряжений переменного тока в напряжение постоянного тока?

V. Измерительные мосты и компенсаторы постоянного и переменного тока.

Мосты для измерения сопротивления на постоянном токе. Мосты переменного тока для измерения емкости и угла потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек. Потенциометры постоянного тока для измерения ЭДС, напряжений, тока. Структурные схемы и принцип функционирования. [1: с.186...212; 2: с.79, 80, 102...107; 3: с.133, 134, 269...272; 4: с.219...225, 284...296].

V.1. Основные сведения и методические указания.

Измерительные мосты и компенсаторы относятся к измерительным приборам, использующим метод непосредственного сравнения измеряемой величины с мерами, включенными в структуру прибора. Общая их особенность состоит в том, что для получения результата необходимо выполнить ряд операций, приводящих измерительную цепь в состояние равновесия. Мостовые измерительные схемы широко используются для измерения параметров элементов электрических цепей. При изучении мостовых цепей необходимо ознакомиться с основными соотношениями, конфигурациями схем, рассмотреть чувствительность как важную метрологическую характеристику любого прибора сравнения.

Потенциометры постоянного тока используются для точных измерений напряжений. Обратите внимание на своеобразный принцип действия, основные элементы потенциометра, на оценку погрешности данного средства измерений. Компенсаторы переменного тока имеют более сложные уравнения равновесия, так как в этом случае для уравнивания двух напряжений необходимо обозначить равенство напряжений по модулю, противоположность по фазе, равенство частоты и идентичность формы кривой.

V.2. Вопросы для самопроверки.

1. Чем ограничиваются нижний и верхний пределы измерений активных сопротивлений одинарными мостами постоянного тока?
2. Изобразите схему простейшего моста для измерения емкости; для измерения индуктивности.
3. Можно ли уравновесить мост переменного тока при произвольном характере сопротивлений плеч?
4. Почему с помощью потенциометров возможно измерение ЭДС источника?
5. Объясните функциональные схемы автоматического моста и автоматического компенсатора?
6. Что применяется в качестве индикатора равновесия в мостах постоянного тока?
7. Какими приборами измеряют добротность катушек индуктивности?
8. Какие преимущества имеет четырехзажимное включение измеряемого резистора в схему одинарного моста.
9. Как изменится чувствительность моста постоянного тока, если включить дополнительный резистор в диагональ питания?
10. Чем обусловлена погрешность мостов постоянного тока?
11. Чем обусловлена погрешность мостов переменного тока?
12. Какие индикаторы равновесия применяются в мостах переменного тока?

VI. Цифровые измерительные приборы.

Дискретизация, квантование и кодирование непрерывных физических величин. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Структурная схема цифрового измерительного прибора. Цифровые приборы для измерения временных интервалов, частоты и периода электрических колебаний. Интегрирующие цифровые вольтметры.

[1: с.212...257; 2: с.84...89, 109, 110, 116...118; 3: с.113...124, 140...150, 205...215; 280...286; 4: с.137...158, 270...272].

VI.1. Основные сведения и методические указания

Цифровыми измерительными устройствами называются устройства, в которых численное значение измеряемой величины отображается в виде числа, представленного в той или иной системе счисления.

Следует отметить, что цифровые измерительные устройства могут быть с ручным управлением процесса измерения (в случае измерения пассивных параметров электрических цепей их называют **измерительными мостами**, а в случае измерения активных параметров – **измерительными компенсаторами**) и автоматическим. Однако, в настоящее время, под цифровыми

измерительными устройствами обычно понимают цифровые устройства, измерительный процесс в которых осуществляется автоматически.

Цифровые измерительные устройства (ЦИУ) обычно имеют более сложную структуру, чем аналоговые, и могут состоять из нескольких сравнительно автономных узлов. Так, например, они могут иметь предварительные входные блоки, которые обычно включают в себя устройства автоматического выбора предела измерения, устройства автоматического выбора и определения полярности измеряемой величины, устройства коррекции систематической погрешности, устройства защиты от перегрузки и т.п. Кроме того, ЦИУ часто включают в себя блоки аналоговых преобразователей, целью которых является преобразование входной измеряемой величины в другую аналоговую величину, численное значение которой определяется более эффективно (например, с большим быстродействием, с большей точностью, с наименьшей потребляемой мощностью, более дешевым способом и т.п.). В качестве аналоговых величин, подвергающихся непосредственно процессу получения его численного значения, в ЦИУ наиболее часто используют временной интервал, частоту или число импульсов, а также постоянное напряжение (ток). Отметим также, что в ряде случаев более простым и удобным является получение численного значения линейного перемещения или угла поворота.

Преимущество использования для непосредственного измерения временного интервала заключается в простоте получения точной единицы сравнения (меры) в виде периода повторения импульсов генератора с кварцевой стабилизацией частоты.

Преобразование измеряемой величины в частоту или число импульсов позволяет весьма просто осуществить процесс получения численного значения обычным подсчетом числа импульсов за образцовый интервал времени, который также легко реализуется с помощью стабилизированного кварцем генератора импульсов. А использование постоянного напряжения (тока) в качестве величины, подвергающейся непосредственно операции получения ее численного значения, дает возможность реализации максимального быстродействия.

В современных ЦИУ процесс сравнения измеряемой величины с мерами и получение ее численного значения полностью автоматизирован, а блок ЦИУ, реализующий этот процесс, получил название **аналого-цифрового преобразователя (АЦП)**.

Получение числового эквивалента аналоговой величины может быть осуществлено только в результате **дискретизации (квантования)** этой величины по уровню, которая определяет так называемую **погрешность квантования**. Часто ее считают специфической методической погрешностью, характерной для цифровых измерительных приборов. Погрешность квантования является случайной величиной, равномерно распределенной в диапазоне от $-q/2$ до $+q/2$, где q – шаг квантования, равный по величине младшему разряду кода численного значения результата. Обычно,

инструментальная погрешность цифрового прибора не должна превышать его погрешности квантования.

При измерении процессов, т.е. величин, изменяющихся во времени, чрезвычайно важным является привязка полученного измеренного значения к моменту времени измерения. Определение этих моментов времени называется **дискретизацией** измеряемой величины во времени и погрешность в их определении существенным образом сказывается при дальнейшей обработке этих величин, увеличивая погрешность конечного результата.

Таким образом, при практическом использовании цифровых измерительных устройств важно различать погрешность **квантования**, определяемую дискретностью по уровню измеряемой величины, которая относится к погрешности **статической**, т.е. погрешности, возникающей при измерении не изменяющихся за время измерения величин, и погрешность **динамическую**, которая дополнительно возникает за счет изменения измеряемой величины за время одного измерения. Первая определяется только свойствами самого измерительного устройства, а третья – еще и характеристикой измеряемого сигнала.

Основными характеристиками цифровых измерительных устройств являются: инструментальная статическая погрешность, нормируемая двучленной формулой, погрешность квантования, задаваемая числом разрядов отсчетного устройства, быстродействие, предел измерения, входное сопротивление, потребляемая мощность, а также **апертурное время**, характеризующее временную неопределенность привязки отчета при измерении различного рода процессов. Произведение апертурного времени на производную измеряемого сигнала в точке отсчета определяет максимальную динамическую погрешность измерения. Для уменьшения динамической погрешности в блок входных устройств цифрового измерительного прибора часто включают так называемое устройство выборки и хранения (УВХ), которое по сути дела является аналоговым ЗУ, запоминаям мгновенные значения измеряемого сигнала в заданных точках на время одного измерения.

Отметим, что для цифровых измерительных устройств, предназначенных для измерения параметров пассивных электрических величин (сопротивлений, емкостей, индуктивностей и т.п.) понятие входного сопротивления не имеет смысла, поскольку измеряемая величина является не источником электрической энергии, а наоборот, ее потребителем. Источником же энергии является само измерительное устройство. Для измерительных устройств этого типа указывается и нормируется значение величины электрического тока или напряжения, которое появляется на измеряемой пассивной электрической величине в процессе измерения. Знание этих величин очень важно, поскольку они в ряде случаев могут повлиять на измеряемый параметр, а иногда могут привести и к его необратимым изменениям (электрический пробой измеряемых конденсаторов, сгорание провода катушки индуктивностей и т.п.).

Кроме перечисленных ЦИУ часто включает в себя блок простейшей обработки полученных численных значений, а также, цифровое отсчетное

устройство. Таким образом, в общем виде, цифровое измерительное устройство может быть представлено в виде структурной схемы приведенной на рис VI.1.

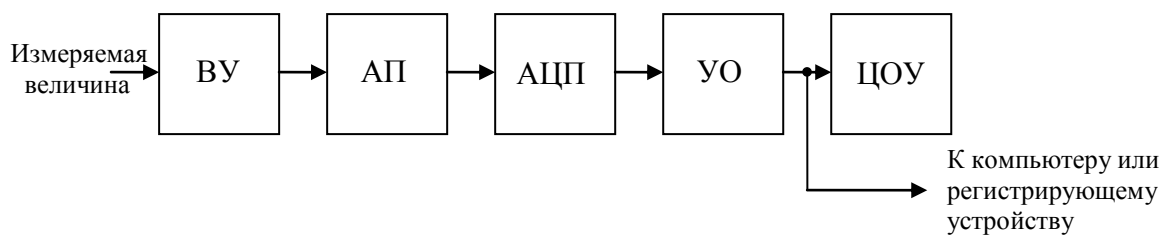


Рис.VI.1. Обобщенная блок-схема цифрового измерительного устройства.

Здесь: **ВУ** – блок входных устройств, к которым относятся устройства выбора предела измерения, устройства определения и выбора полярности измеряемой величины, устройства, повышающие входное сопротивление цифрового прибора и его помехозащищенность и т.п.

АП – блок аналогового преобразования, в котором происходит преобразование аналогового сигнала одного вида в аналоговый сигнал другого вида, наиболее удобный для процесса получения численного значения измеряемой величины. Как уже упоминалось, у практически используемых АП, в большинстве случаев, входной сигнал преобразовывается в напряжение постоянного тока, временной интервал, а также частоту или число электрических импульсов.

АЦП – блок аналого-цифрового преобразования, в котором выполняются основные измерительные операции – дискретизация во времени, квантование по уровню и кодирование измеряемой аналоговой величины в той или другой системе счисления.

УО – устройство обработки, в котором может происходить простейшая предварительная обработка результатов измерения, например:

- Вычисление частоты по измеренному периоду в частотомерах низких и инфранизких частот;
- Вычисление среднего значения сдвига фаз в цифровых фазометрах;
- Вычисление среднего значения результатов серии измерений, что дает возможность уменьшить случайную составляющую погрешности измерения;
- Осуществление цифрового метода коррекции дрейфа параметров измерительного устройства, с целью уменьшения систематической погрешности измерения.

ЦОУ - блок цифрового отсчетного устройства, как правило, включающего в себя жидкокристаллические, газоразрядные или светодиодные индикаторы, схемы управления этими индикаторами, а также преобразователи кодов чисел из системы счисления, в которой непосредственно получается

числовой эквивалент измеряемой величины в код числа, необходимый для правильной работы используемого индикатора.

Как правило, во всех современных цифровых измерительных устройствах предусматривается вывод результатов измерения на регистрирующее устройство того или иного типа, или непосредственно в компьютер. Отметим также, что блок АЦП присутствует в любом типе цифрового измерительного устройства, в отличие от всех остальных блоков, присутствие которых зависит от конкретного типа устройства.

Рассмотрим несколько подробнее принципы преобразования аналоговых сигналов наиболее широко используемых в цифровых измерительных устройствах.

Преобразование напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока. Преобразование этого типа большей частью осуществляется при помощи обычных двухполупериодных выпрямителей, выполненных на полупроводниковых диодах.

Преобразование токов в напряжение постоянного тока.

Преобразование токов в напряжение постоянного тока обычно осуществляется путем пропускания измеряемого тока через образцовый резистор, падение напряжения на котором будет пропорционально этому току.

Преобразователи сопротивлений в напряжение постоянного тока.

Преобразование сопротивлений в напряжение постоянного тока обычно осуществляется путем пропускания образцового тока от стабилизированного генератора тока через измеряемое сопротивление, падение напряжения на котором будет пропорционально этому сопротивлению.

Преобразование напряжение постоянного тока в интервал времени.

Наиболее широко в качестве измерительного преобразователя в интервал времени используются двухтактные интегрирующие преобразователи напряжения постоянного тока в интервал времени. При этом если измеряемая величина имеет другую природу, используют предварительное преобразование ее в напряжение постоянного тока при помощи дополнительных специальных преобразователей (выпрямителей, образцовых сопротивлений, термопреобразователей и т.п.)

В основе двухтактного интегрирующего преобразователя напряжения постоянного тока в интервал времени лежит интегратор, реализованный на операционном усилителе. Принцип двухтактного интегрирующего преобразования напряжения постоянного тока в интервал времени схематически представлен на рис. VI.2.

В первом такте интегратор интегрирует входное напряжение за образцовый (калиброванный) интервал времени, кратный периоду преобладающей помехи (как правило, периоду сетевого напряжения). Главное назначение первого такта интегрирования – уменьшение влияния помех на входе измерительного устройства. В результате первого такта преобразования, на выходе операционного усилителя формируется среднее значение измеряемого напряжения за этот такт.

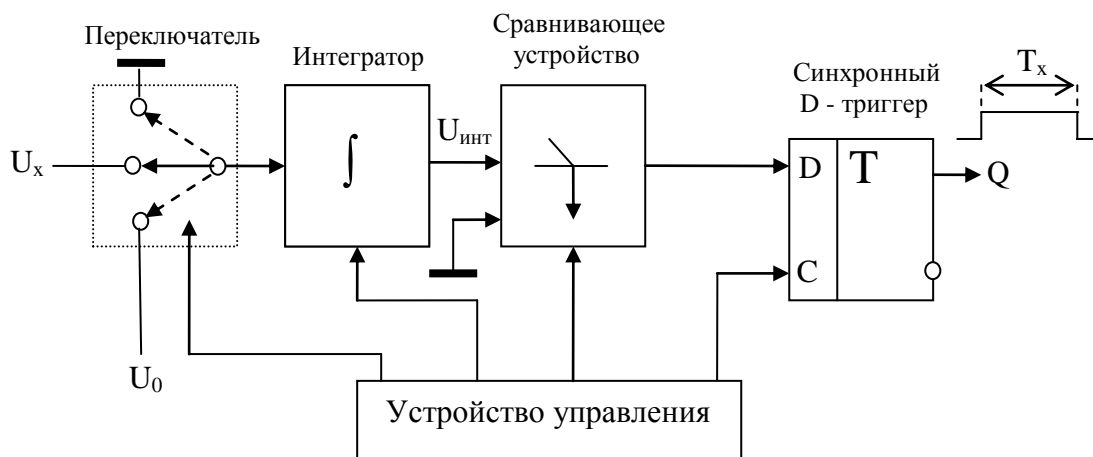


Рис. VI.2. Схема, иллюстрирующая принцип работы простейшего преобразователя напряжения в интервал времени.

Во втором такте полученное значение реинтегрируется, т.е. емкость конденсатора операционного усилителя разряжается до некоторого постоянного порогового уровня, путем подачи на вход интегратора образцового постоянного напряжения обратного знака, по отношению к измеряемому напряжению. Интервал времени от начала реинтеграции до момента достижения выходным напряжением интегратора этого порогового уровня будет пропорционален среднему значению, за время первого такта интегрирования, входного напряжения. Этот интервал может быть определен по формуле

$$T_x = U_x \cdot \frac{T_0}{U_0}$$

где U_0 - значение образцового напряжения;

U_x - среднее значение входного напряжения за интервал T_0 ;

T_0 - интервал первого такта интегрирования.

Поскольку и во втором и в первом такте интегрирования используется один и тот же интегратор, параметры которого за время измерения практически не могут измениться существенно, то главная погрешность преобразования в двухтактном интегрирующем преобразователе будет определяться стабильностью образцового напряжения, подаваемого на вход интегратора во втором такте.

Преобразование напряжения постоянного тока в частоту импульсов.

Принцип функционирования типового преобразователя напряжения постоянного тока в частоту импульсов представлен на схеме, изображенной на рис. VI.3. В основе схемы преобразователя лежат два операционных усилителя: ОУ1, который используется в качестве интегратора, и ОУ2, работающий в режиме регенеративного компаратора. Регенеративный компаратор представляет собой устройство, которое в зависимости от полярности входного напряжения порогового уровня может находиться только в двух устойчивых состояниях: с положительным максимальным выходным напряжением U_{\max}^+ и отрицательным максимальным выходным напряжением U_{\max}^- .

Пусть выходное напряжение преобразователя U_{\max}^+ . В этом случае диод VD заперт и напряжение на выходе ОУ1 - $U_{\text{вых}}^1$ под воздействием

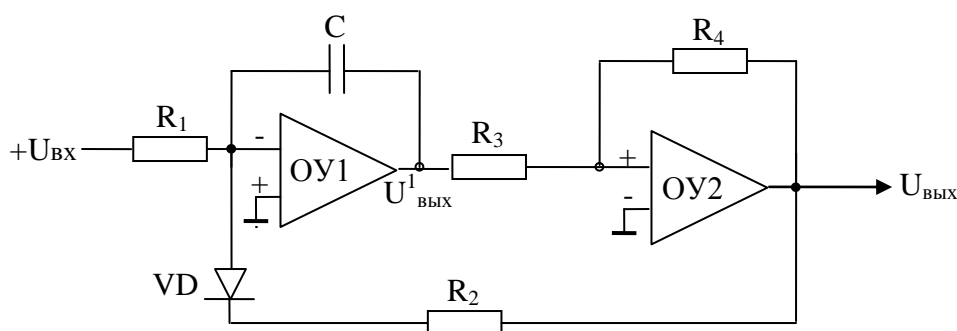


Рис. VI.3. Простейшая схема преобразователя напряжения постоянного тока в частоту повторения импульсов.

положительного входного напряжения $U_{\text{вх}}$ линейно уменьшается со скоростью, определяемой величиной $U_{\text{вх}}$. Когда это напряжение достигнет порога срабатывания регенеративного компаратора, он переключается в другое возможное состояние с $U_{\text{вых}} = U_{\max}^-$. Это напряжение открывает диод VD и, поскольку $R_2 \ll R_1$, происходит быстрый заряд конденсатора C и повышение $U_{\text{вых}}^1$ до порога срабатывания регенеративного компаратора в другое устойчивое состояние, с выходным напряжением U_{\max}^+ , которое снова запирает диод VD. Снова начинается медленный линейный разряд конденсатора C входным напряжением $U_{\text{вх}}$ и цикл повторяется.

Моменты срабатывания компаратора определяют моменты появления на выходе $U_{\text{вых}}$ коротких импульсов, длительность которых определяется гистерезисом регенеративного компаратора, а частота их появления входным напряжением $U_{\text{вх}}$. Эта частота может быть оценена выражением

$$F = U_{\text{вх}} \cdot \frac{1}{CR_1} \cdot \frac{R_4}{R_3(U_{\max}^+ - U_{\max}^-)}.$$

Преобразование напряжения постоянного тока в число импульсов.

В последнее время весьма интенсивно развиваются преобразователи напряжения постоянного тока в число импульсов, так называемые сигма-дельта модуляторы. Эти преобразователи позволяют создавать ЦИУ высокой точности и помехозащищенности, с огромным динамическим диапазоном измерения, при достаточно высоком быстродействии. В их основе также лежат интеграторы на операционных усилителях. Принцип работы простейшего сигма-дельта модулятора иллюстрирован на рис. VI.4.

На вход интегратора, выполненного на операционном усилителе ОУ, подается сумма входного преобразуемого напряжения U_x и, попеременно, положительное и отрицательное образцовые (калиброванные) напряжения $+E_0$ и $-E_0$. Эти образцовые напряжения по абсолютной величине выбираются равными предельно-допустимому значению входного напряжения U_x . Полярность образцовых напряжений может изменяться только в моменты, определяемые импульсами синхронизации, генерируемыми генератором тактовых импульсов G.

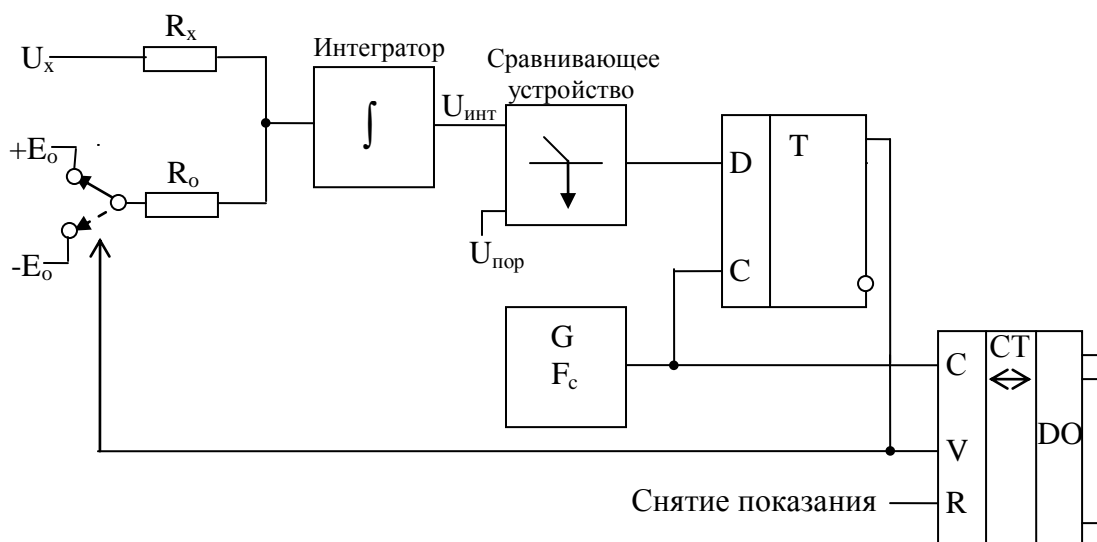


Рис. VI.4. Схема, иллюстрирующая работу сигма-дельта модулятора.

Сам же факт изменения полярности, т.е. переключения образцовых напряжений, определяется превышением входного напряжения интегратора $U_{\text{инт}}$, порогового уровня срабатывания сравнивающего устройства, управляющего D-триггером T. Одновременно с изменением полярности образцового напряжения меняется по входу V и режим счета реверсивного счетчика импульсов CT (суммирования или вычитания). Вся система работает таким образом, чтобы на входе операционного усилителя, разницу между U_x и E_0 все время сводить к минимальному значению.

При $U_x = 0$, напряжение на выходе интегратора $U_{\text{инт}}$ будет находиться, по величине, выше порогового уровня и ниже его одинаковое время. Следовательно, и реверсивный счетчик СТ одинаковое время будет находиться в режиме суммирования и в режиме вычитания. Следовательно, сумма накопленных за время преобразования числа импульсов будет близка к нулю. Поэтому, и результат преобразования, с учетом заданной погрешности, будет равен нулю. При $U_x \neq 0$, триггер Т будет находиться в одном из своих двух устойчивых состояний больше, чем во втором и, следовательно, за период преобразования в счетчике СТ накопится число импульсов, которое будет пропорционально входному напряжению U_x . Заметим, что отрицательные значения U_x , в этом случае, представлены в счетчике СТ в дополнительном коде.

Время, за которое подсчитывается число накопленных в счетчике импульсов, т.е. время преобразования, определяется интервалом между импульсами снятия показания со счетчика СТ.

В связи с тем, что частота синхронизации может быть выбрана весьма высокой, и в связи с самим принципом сигма-дельта модуляции, преобразуемое напряжение может изменяться со сравнительно большой скоростью, поскольку интервал времени снятия отсчета может задаваться достаточно малым. Преобразователями этого типа можно получать с достаточно приемлемой точностью отсчеты даже аудиосигналов.

Этот тип преобразования часто называют преобразованием с непрерывным интегрированием, поскольку входное напряжение интегратора путем изменения полярности компенсирующих образцовых напряжений непрерывно поддерживается близким к нулю (приближающимся к нулю).

Число импульсов, накопленное в реверсивном счетчике за интервал преобразования, будет выражаться формулой

$$N_x = U_x \cdot \left(N_m \cdot \frac{R_o}{R_x \cdot E_o} \right),$$

где U_x – входное преобразуемое напряжение;

N_m – максимальное число счетных импульсов, которое вырабатывается генератором тактовых импульсов за время преобразования $T_{\text{пр}}$.

$$N_m = T_{\text{пр}} \cdot F_c.$$

Имеются две области использования цифровых измерительных устройств. Первая область – использование их в качестве устройств ввода в измерительно-вычислительных комплексах (виртуальных измерительных приборах, SCADA – системах (Supervisory for Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) и т.п.), а вторая – использование их в качестве автономных цифровых измерительных приборов в лабораторных или производственных условиях. В первом случае результат измерения используется техническими устройствами автоматической обработки информации, а во втором – результат измерения предназначен для непосредственного восприятия человеком. Эти обстоятельства приводят к

некоторым различиям между цифровыми устройствами, разрабатываемыми для этих двух областей их применения, а именно:

- В цифровых измерительных устройствах, предназначенных для использования непосредственно человеком, численное значение измеряемой величины формируется либо непосредственно в десятичной, либо двоично-десятичной системе счисления для упрощения последующего его преобразования в десятичную систему, наиболее удобную для человека. В цифровых измерительных устройствах, которые используются в различного рода автоматизированных системах сбора и обработки данных, формирование численного значения измеряемой величины происходит в двоичной системе счисления, удобной для последующей компьютерной обработки.

- Цифровые измерительные устройства, предназначенные для работы с человеком, не нуждаются в большом быстродействии, так как человек все равно не сможет воспринять информацию больше 10 бит/с. В то же время для цифровых измерительных устройств, предназначенных для работы в системах с дальнейшей автоматической обработкой измерительной информации, быстродействие является одной из важнейших характеристик.

- Цифровые измерительные устройства, предназначенные для работы непосредственно с человеком, обязательно должны иметь отсчетные устройства, индицирующие результат измерения в десятичной системе счисления. Цифровые измерительные устройства, работающие в составе систем с дальнейшей обработкой, либо вообще не имеют отсчетных устройств, либо имеют его в качестве вспомогательного узла, используемого в процессе настройки системы или ее ремонта, причем индикация в этом случае, осуществляется, как правило, в двоичной системе счисления.

Эти особенности приводят к тому, что некоторые методы аналого-цифрового преобразования, становятся более предпочтительными для использования в цифровых измерительных устройствах одной области применения, а другие, наоборот, - более предпочтительны для использования в цифровых измерительных устройствах другой области.

Как следует из всего изложенного выше, основным блоком цифрового измерительного устройства является блок аналого-цифрового преобразования (АЦП), в котором происходит формирование числового эквивалента измеряемой величины. Обобщенная структурная схема АЦП изображена на рис. VI.5.

Благодаря блокам масштабного преобразования измеряемая и образцовая величины могут участвовать в процессе сравнения и, следовательно, формировании числового значения измеряемой величины как непосредственно, так и в виде своих дробных (или кратных) значений. Последовательность формирования этих дробных (или кратных) значений этих величин и их сравнение между собой определяет алгоритм проведения процесса измерения. Различие этих алгоритмов определяет различие возможных методов аналого-цифрового преобразования. Последовательность операций сравнения A_x с

мерами, формируемыми из образцовой величины A_0 , автоматически определяется устройством управления УУ.

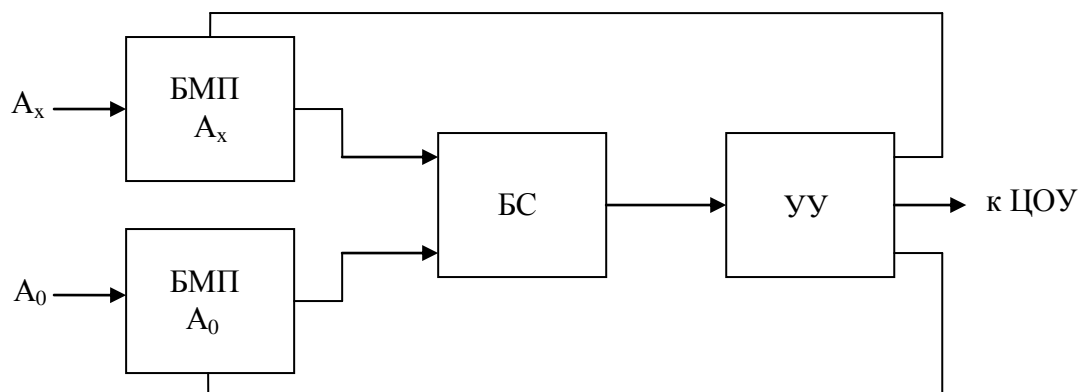


Рис. VI.5. Обобщенная схема блока АЦП ЦИУ.

Здесь: A_x – измеряемая величина;
 A_0 – образцовая величина (мера);
 БМП – блоки масштабного преобразования;
 БС – блок сравнения;
 УУ – устройство управления.

Связь между УУ и БМП может быть обратная – тогда говорят о **замкнутых АЦП**, или **АЦП с обратной связью** (так называемые **АЦП уравнивания**), а может быть и прямая или отсутствовать вообще, тогда говорят о **разомкнутых АЦП**, или **АЦП прямого преобразования**.

Как уже упоминалось, основным блоком любого цифрового измерительного устройства является блок АЦП, в котором осуществляется собственно процесс измерения, т.е. получения численного значения измеряемой величины. Поэтому в качестве критерия при классификации цифровых измерительных устройств целесообразно принять основные принципы, положенные в основу процесса аналого-цифрового преобразования.

Процесс аналого-цифрового преобразования, т.е. процедура приближения формируемого численного значения измеряемой величины к ее аналоговому эквиваленту может осуществляться либо последовательно во времени, либо одновременно во всех разрядах результата, либо последовательно-параллельно. Поэтому все типы цифровых измерительных устройств можно разделить на три основные группы:

- ЦИУ последовательного счета или уравнивания;
- ЦИУ параллельного считывания;
- ЦИУ параллельно-последовательного уравнивания.

ЦИУ последовательного счета или уравнивания характерны тем, что в его АЦП формирование образцовой величины (меры) осуществляется приращением ее значения последовательно во времени, до момента сравнения с измеряемой аналоговой величиной. Приращение это может осуществляться единицами квантования и подсчетом числа этих единиц в специальном счетчике. При этом если подход к состоянию равенства осуществляется с одной стороны, говорят о ЦИУ развертывающего уравнивания. Если же подход к состоянию равенства может осуществляться как при увеличении, так и при уменьшении образцовой величины, то говорят о ЦИУ слеящего уравнивания. Однако формирование компенсирующей образцовой величины может формироваться также ступенями с весовыми коэффициентами, соответствующими непосредственно весовым разрядам двоичных или двоично-десятичных чисел. При этом если очередное, сформированное в текущем такте, значение образцовой величины станет больше измеряемой величины, эта ступень сбрасывается и суммируется следующая. Это дает возможность существенно сократить время преобразования до n тактов ($n = \log N$, где N – число уровней квантования диапазона измерения). ЦИУ, основанные на таком методе получения численного значения аналоговой величины получили название ЦИУ поразрядного уравнивания или поразрядного кодирования. Некоторые авторы называют их ЦИУ с кодоимпульсным преобразованием.

При аналого-цифровом преобразовании напряжения постоянного тока единицей квантования служит, формируемое в блоке масштабного преобразования образцовой величины АЦП, единичное эталонное падение напряжения.

При аналого-цифровом преобразовании временных интервалов единицей квантования служит период повторения импульсов образцового генератора, стабилизированного кварцевым резонатором в блоке масштабного преобразования образцовой величины АЦП.

При аналого-цифровом преобразовании частоты или числа импульсов образцовый интервал времени (мера), за который подсчитывается число периодов измеряемой частоты, также формируется блоком масштабного преобразования образцовой величины.

ЦИУ параллельного считывания отличается тем, что блок масштабного преобразования его АЦП одновременно включает в себя весь набор образцовых величин, отличающихся друг от друга на единицу дискретности шкалы прибора (квантования измеряемой величины). Таким образом, измеряемая величина одновременно, за один такт, сравнивается со всеми возможными ее значениями с точностью до единицы квантования. Отсюда следует, что АЦП ЦИУ, основанных на этом методе, должны иметь блок сравнения БС, состоящий из n сравнивающих устройств, где n число уровней квантования шкалы. Число сработавших сравнивающих устройств определяет численное значение преобразуемой аналоговой величины в единичном коде. Затем это значение преобразователями кода переводится в число представленное в требуемой системе счисления.

В ЦИУ параллельно-последовательного уравнивания процесс формирования численного значения аналоговой величины осуществляется за несколько тактов, однако в каждом такте одновременно используются несколько сравнивающих устройств. При использовании n сравнивающих устройств в блоке сравнения, в первом такте осуществляется как бы грубое приближение к числовому значению преобразуемой величины, с погрешностью $1/n$ диапазона преобразования. Аналоговая величина, соответствующая этому грубому численному значению, вычитается из преобразуемой аналоговой величины, и эта разность снова поступает в блок сравнения. Во втором такте пороги срабатывания сравнивающих устройств уменьшаются в n раз, и погрешность преобразования уменьшается до $1/n^2$ диапазона преобразования и т.д. В результате формируется численное значение исходной аналоговой величины с заданной погрешностью квантования.

Большинство цифровых измерительных приборов лабораторного типа широкого назначения принадлежат к ЦИУ последовательного счета и уравнивания. В этом случае быстродействие измерительных устройств отступает на второй план. В первую очередь от них требуется простота и, следовательно, дешевизна изготовления, помехоустойчивость, а также точность измерения. Среди этих приборов наибольшее распространение получили комбинированные ЦИУ (авометры) с предварительным преобразованием измеряемой величины в интервал времени (ЦИУ двухтактного интегрирования), или в число импульсов (ЦИУ с сигма-дельта модуляцией).

VI.2. Вопросы для самопроверки

1. Перечислите наиболее важные преимущества ЦИУ
2. Назовите две основные области применения ЦИУ и укажите особенности их характеристик в этих областях.
3. Перечислите блоки обобщенной структурной схемы ЦИУ и поясните их назначение.
4. Перечислите основные характеристики ЦИУ.
5. Какие характеристики ЦИУ зависят не только от самого ЦИУ, но и от скорости изменения измеряемой величины? Какие меры предпринимаются для их уменьшения?
6. Перечислите способы нормирования точности ЦИУ.
7. Перечислите физические аналоговые величины, наиболее удобные для получения их численных значений.
8. Дайте краткую характеристику принципу наиболее применяемого в ЦИУ типа преобразования напряжения постоянного тока в интервал времени.
9. Дайте краткую характеристику принципу наиболее простого типа преобразования напряжения постоянного тока в частоту.
10. Дайте краткую характеристику принципу наиболее простого типа преобразования напряжения постоянного тока в число импульсов.

VII. Приборы для анализа сигналов.

Электронные осциллографы. Назначение и классификация. Параметры, структурная схема и принцип функционирования универсальных осциллографов. Цифровые осциллографы. Применение электронных осциллографов для измерения напряжения и тока, частоты и угла сдвига фаз, измерения параметров импульсов. Погрешности при измерениях производимых с помощью осциллографов.[1: с.175...183; 2: с.89...95, 120...122; 3: с.174...197, 216...221; 4: с.177...212, 259...261, 272...275].

VII.1. Основные сведения и методические указания.

Электронным осциллографом называют электронное устройство, позволяющее наблюдать на экране график изменения напряжения, подаваемое на его вертикально-отклоняющий вход. Развертывающее по ширине экрана напряжение подается на горизонтально-отклоняющий вход. Поскольку в подавляющем большинстве случаев, требуется наблюдать изменение входного напряжения во времени, то развертывающее напряжение формируют линейно возрастающим во времени, т.е. пилообразным.

Способность визуализировать сигналы – чрезвычайно важное качество осциллографа, позволяющее оперативно проводить контроль и диагностику электрических цепей. Кроме того, современные осциллографы позволяют получать графики сигналов с весьма точно выдержанными масштабами по осям координат, что позволяет определять в различные моменты времени период, частоту и сдвиг сигналов по фазе. Таким образом, современный осциллограф является универсальным измерительным устройством.

Разработаны и используются различные типы электронных осциллографов: универсальные, скоростные, запоминающие и специальные.

Самые распространенные *универсальные осциллографы* позволяют исследовать разнообразные электрические сигналы с длительностью от единиц наносекунд до нескольких секунд в диапазоне от долей милливольт до сотен вольт. Полоса лучших универсальных осциллографов составляет 300...400 МГц. Часто универсальные осциллографы выполняют со сменными блоками, расширяющими их функциональные возможности.

Для исследования быстропротекающих процессов (нано- и пикосекундной длительности) предназначены *скоростные осциллографы*, в которых используется специальная электронно-лучевая трубка бегущей волны.

Запоминающие осциллографы, имеющие специальные электронно-лучевые трубки, обладают способностью сохранять и воспроизводить изображение сигнала в течение длительного времени после исчезновения его на входе. Основное назначение запоминающих осциллографов – исследование однократных и редко повторяющихся процессов.

Специальные осциллографы оснащены дополнительными блоками целевого назначения. К ним относятся и цифровые осциллографы,

позволяющие не только наблюдать сигнал, но и передавать его в цифровом виде на компьютер для дальнейшей обработки. Специальные осциллографы снабжаются блоками измерения напряжений, токов и сопротивлений (мультиметрами), а также устройствами для исследования вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов.

По числу одновременно наблюдаемых на экране сигналов различают *одноканальные* и *многоканальные осциллографы*. Совмещение на экране изображений нескольких входных сигналов реализуют или использованием специальных многолучевых трубок, или путем периодического переключения осциллографа на разные входы с помощью электронного коммутатора.

Цифровые осциллографы

В последнее время большее значение приобретают цифровые осциллографы, несмотря на значительно большую их стоимость по сравнению с обычными, аналоговыми осциллографами. Главное их отличие заключается в том, что исследуемые непрерывные сигналы еще на входе осциллографа, с помощью специальных аналого-цифровых преобразователей, преобразуются в цифровую форму, т.е. представляются в виде последовательности числовых кодов. Поэтому, благодаря дальнейшей обработке в самом осциллографе этой цифровой информации с помощью микропроцессорной техники, можно получить значение широкого ряда параметров исследуемого сигнала и с высокой точностью. А, следовательно, на экране осциллографа можно отображать не только сам исследуемый процесс, и, одновременно его числовые параметры, но, например, его спектральный состав или автокорреляционную функцию. Однако, заметим, что бурно развивающиеся в настоящее время так называемые *виртуальные приборы* создают им серьезную конкуренцию.

VII.2. Вопросы для самопроверки.

1. При каких условиях возможно получение изображения временного процесса на экране осциллографа?
2. В каких режимах может работать генератор напряжения развертки электронного осциллографа?
3. Для чего нужна синхронизация напряжения развертки в осциллографе, и какие виды синхронизации в нем используются?
4. Как с помощью универсального осциллографа измерить напряжение входного напряжения, его частоту и период?
5. В чем особенность двулучевых и двухканальных осциллографов, и какие новые возможности они дают?
6. Предложите способ нахождения траектории светящегося пятна на экране осциллографа при произвольных $U_x(t)$ и $U_y(t)$.
7. В чем заключается принципиальное отличие цифровых осциллографов от обычных аналоговых?
8. Как определить экспериментально нелинейность развертывающего напряжения осциллографа?

9. Изобразить осциллограмму, которая должна получиться на экране осциллографа, если частота f исследуемого сигнала синусоидальной формы равна 5 кГц, а частота f_p линейно изменяющегося напряжения развертки идеальной формы равна 4 кГц.

VIII. Виртуальные измерительные приборы.

Понятие виртуальных измерительных приборов, их возможности, преимущества и перспективы развития. Принцип организации. [3: с.350...353; 5: с.31...36; 6: с. 7...13].

VIII.1. Основные сведения и методические указания.

Бурное развитие компьютерной техники привело к ее внедрению практически во все отрасли науки и техники. Не минуло это и технику измерений в самом широком значении этого понятия.

Сначала компьютеры использовались как отдельное оборудование для управления измерительным процессом и обработки экспериментальных данных с целью получения результатов косвенных и совокупных измерений, требующих достаточно сложных и объемных вычислений. Затем стали практиковать вывод этих результатов на дисплеи персональных компьютеров, используя их как шкалы или отсчетные устройства измерительных приборов. В дальнейшем, развитие аппаратных средств и специального программного обеспечения, привело к сращиванию цифровой измерительной техники с компьютером в такой степени, что появилось новое понятие - **виртуальный измерительный прибор**.

Виртуальный измерительный прибор представляет собой персональный компьютер или систему, в простейшем случае со специальной встраиваемой платой сбора данных, либо, в случае более сложных многофункциональных измерений, с дополнительным блоком, соединенным с компьютером соединительным кабелем. Плата или дополнительный блок осуществляют функцию ввода в компьютер, коммутации, дискретизации, квантования и кодирования сигналов, поступающих от контролируемых объектов. А функцию моделирования требуемой измерительной системы, выполнения обработки полученных численных значений входных сигналов (т.е. фактически результатов измерения этих сигналов) по заданным алгоритмам, а также отображение результатов обработки на экране в желаемом виде, определяет компьютер под управлением специально разработанного программного обеспечения. Особенностью виртуальных приборов является и то, что все ручки управления и структура смоделированной измерительной системы отображается также на дисплее компьютера и сам процесс управления осуществляется наглядно и удобно, с помощью типовой клавиатуры или манипулятора (мыши). Поэтому, такая виртуальная панель управления измерительным прибором, в отличие от панели управления обычной

измерительной аппаратуры, может быть многократно перепроектирована для оптимального использования в конкретных условиях проводимого измерительного эксперимента. Используя подходящую плату или блок сбора данных, а также соответствующее программное обеспечение, экспериментатор как бы проектирует измерительное устройство, оптимально приспособленное для решения той или иной метрологической задачи.

Таким образом, технология виртуальных приборов опирается на современную компьютерную технику в комбинации с гибким специальным программным обеспечением и модульным высокопроизводительным оборудованием для создания мощных компьютерных измерительных систем.

Современные виртуальные измерительные приборы позволяют измерять и анализировать как локальные, так и удаленные величины, и процессы со временем измерения десятки наносекунд и погрешностью в сотые и тысячные доли процента. Их возможности в настоящее время возросли настолько, что даже превосходят аналогичные показатели традиционных приборов. Они позволяют с легкостью осуществлять такую обработку измерительных сигналов как частотно-временной анализ, спектральный анализ высокого разрешения, цифровую фильтрацию, различного рода статистическую обработку и пр. При этом они позволяют наглядно отображать на экране дисплея значения измеряемых величин, осциллограммы различных процессов, их амплитудно-частотные характеристики как двумерные, так и в виде объемных графических изображений, спектральные плотности и гистограммы статистической обработки и т.п.

Наиболее известной фирмой, разрабатывающей как аппаратные модули, так и программное обеспечение, является фирма National Instruments (NI). Разработанные ею аппаратные модули и специализированное программное обеспечение виртуальных приборов под общим названием LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – лабораторный виртуальный прибор рабочего места инженера), получило широкое распространение, улучшается и расширяется с каждым годом и охватывает огромный спектр возможностей как управления процессом измерения, так и методов обработки и отображения результатов измерения.

VIII.2. Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под виртуальным измерительным прибором?
2. Из каких основных частей состоит виртуальный измерительный прибор?
3. Какие новые возможности измерений открываются при использовании виртуальных измерительных приборов?

IX. Системы сбора и обработки измерительной информации.

Общее понятие, назначение и классификация. Понятие интерфейса. Принципы построения и примеры реализации. Обобщенная структурная схема. [1: с.331...361; 3: с.346...350; 4: с. 336...354].

IX.1. Основные сведения и методические указания.

В настоящее время в различных областях применения для исследования и контроля сложных объектов необходимо одновременно измерять десятки, сотни и даже тысячи величин, оценивать состояние этих сложных объектов за весьма короткие промежутки времени. Для этих целей и используются системы сбора и обработки измерительной информации (Информационно-измерительные системы), которые, как правило, включают в себя различного рода вычислительные устройства как для первоначальной обработки измерительной информации, так и для управления процесса функционирования системы в целом.

IX.2. Вопросы для самопроверки.

1. Какие разновидности систем сбора и обработки измерительной информации вы можете назвать?
2. Какую функцию в системах сбора и обработки измерительной информации выполняют компьютеры?
3. Какой интерфейс используется в системах сбора и обработки измерительной информации для объединения их отдельных функциональных блоков?
4. Какие принципы разделения входных измеряемых величин используются в системах сбора и обработки измерительной информации?

X. Основы стандартизации и сертификации.

Объекты стандартизации, понятие стандарта. Государственная система обеспечения единства измерений. (ГСИ). основополагающие стандарты в области метрологии. Структура и функции метрологической службы. Эталоны: первичные, вторичные и рабочие. Образцовые средства измерений. Нормирование погрешностей средств измерения. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения поверки. Контроль качества продукции. Инструментальные и экспертные методы оценки качества.

Основные цели, объекты и системы сертификации. Аккредитация испытательных лабораторий. Правило и порядок проведения сертификации. [1:с.23...27, 35...43; 2: с.163...168, 174...182, 186...189, 193...199; 3: с.306...316, 327...329, 335...338, 340...345].

Х.1. Основные сведения и методические указания.

Квалиметрия - дисциплина, изучающая вопросы оценки качества продукции.

Объектами стандартизации – являются изделия, нормы, правила, требования, методы, термины, обозначения и т.п., имеющие перспективу многократного использования в любых сферах человеческой деятельности.

Стандарт – нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации и утвержденный компетентными органами.

Под **метрологическим обеспечением** понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Поверка – операция, устанавливающая соответствие погрешности средств измерений своему классу точности.

Сертификация представляет собой свидетельство, подтверждающее соответствие изделия (услуги) определенным стандартам или другим нормативно-техническим документам.

Обратите внимание на то, что все системы сертификации базируются на проведенных экспериментальных данных, т.е. практически на результатах измерений.

Следует также отметить, что в проблеме обеспечения единства измерений очень важная роль принадлежит эталонам и специальной системе передачи размеров единиц от первичных эталонов к рабочим, от них – к образцовым средствам измерений и далее к рабочим.

Х.2. Вопросы для самопроверки.

1. Что понимается под понятием «стандарт»?
2. Какова цель введения стандартизации?
3. Что характеризует понятие сертификации?
4. Какие основные методы, нормы и средства обеспечивают Государственную систему единства измерений?
5. Что понимается под нормированием средств измерений?
6. Что такое поверка средств измерений?
7. Каково должно быть соотношение погрешности образцового и поверяемого средств измерений?
8. В чем заключается разница между инструментальными и экспертными оценками качества продукции?
9. Приведите поверочную схему средств измерений в общем виде, согласно государственному стандарту.