

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра метрологии и стандартизации

М.Ю. Дерябина

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие
для студентов специальности Т.13.01
«Метрология, стандартизация и сертификация»

Минск 2001

УДК 621.317

ББК 30.10 я 73

Рецензент: заместитель начальника кафедры радиотехники Военной академии Республики Беларусь канд. техн. наук, доцент Нефедов С.Н.

К 72

Дерябина М.Ю.

Основы измерений: Учеб. пособие для студентов специальности Т.13.01 «Метрология, стандартизация и сертификация». - Мн: БГУИР, 2001. - 58 с.: ил. 10..

ISBN 985-444-229-2

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности Т.13.01 «Метрология, стандартизация и сертификация». Материал изложен с учетом требований программ дисциплин, по которым осуществляется подготовка инженеров-метрологов в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, и охватывает ряд вопросов, касающихся основ измерений.

В пособии рассматриваются термины в области метрологии и измерительной техники, основы математической обработки результатов измерений, правила проведения эксперимента и оформления его результатов.

УДК 621.317 (075.8)

ББК 30.10 я 73

ISBN 985-444-229-2

© М.Ю. Дерябина, 2001

Св. план 2001, поз. 28 (вед.)

ВВЕДЕНИЕ

- 1 ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ
 - 2 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 3 КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 4 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 5 КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
 - 6 ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 7 СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 7.1 Классификация систематических погрешностей
 - 7.2 Обнаружение систематических погрешностей
 - 7.3 Способы уменьшения систематических погрешностей и введение поправок
 - 7.4 Суммирование неисключенных систематических погрешностей
 - 8 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
 - 9 СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 9.1 Источники возникновения случайных погрешностей
 - 9.2 Точечные оценки числовых характеристик измеряемой величины
 - 9.3 Оценка с.к.о. результата косвенного измерения
 - 10 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
 - 11 ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 12 ВЫБОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
 - 12.1 Планирование измерений
 - 12.2 Выбор средств измерений
 - 12.3 Основные правила измерений
 - 12.3.1 Составление схемы измерительной установки
 - 12.3.2 Порядок проведения эксперимента
 - 12.3.3 Оформление результатов эксперимента
 - 13 ПРАВИЛА ОКРУГЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТА НАБЛЮДЕНИЙ
 - 14 ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ
 - 14.1 Выбор размера графика
 - 14.2 Выбор формы графика
- ЛИТЕРАТУРА

ВВЕДЕНИЕ

Вся история человечества сопровождалась и сопровождается использованием измерений: без них невозможно ни одно научное открытие, изобретение. Еще М.В. Ломоносов писал: «Через геометрию вымеривать, через механику развешивать, через оптику высматривать». Измерения служат источником нашего научного знания. «В физике существует только то, что можно измерить» (Макс Планк).

Производство промышленной продукции сопровождается большим числом всевозможных измерений. Посредством измерений определяют соответствие изготовленных деталей и изделий в целом требованиям конструкторской документации. Подсчитано, что доля затрат на измерительную технику составляет не менее 15% затрат на оборудование в машиностроении и свыше 25% - в радиоэлектронике, самолетостроительной, химической и некоторых других отраслях промышленности.

Улучшение качества продукции в значительной степени обусловлено тем, насколько хорошо организована измерительная служба предприятия. Нельзя управлять тем или иным процессом без контроля его показателей.

Совершенствование техники измерений, проявляющееся в повышении точности измерений и в создании новых методов и приборов, способствует новым достижениям в науке.

Так, например, увеличение точности взвешивания на один знак привело к открытию в 1892-1984 гг. нового газа аргона, который до этого, ввиду неточности измерений, обнаружить не удавалось. Введение в экспериментальную практику микроскопа создало исключительные возможности для исследования микроорганизмов и привело к созданию микробиологии. Часто необходимость исследования тех или иных явлений вызывает необходимость создания новой, более совершенной аппаратуры. Новые открытия в науке, в свою очередь, приводят к совершенствованию техники измерений, а также к созданию новых приборов.

Первые попытки количественных исследований электрических явлений в природе потребовали создания для этой цели специальных измерительных приборов. Еще в 1744 г. М.И. Ломоносов высказал замечательную мысль о том, что «электричество взвешено быть может». С этой целью он совместно с Г.В. Рихманом создал первый в мире электроизмерительный прибор – «указатель электрической силы», имевший указатель и шкалу.

В дальнейшем по мере развития теории электричества были открыты новые законы, на основании которых разрабатывались новые методы измерений и приборы, совершенствовалась практика измерения.

До открытия радио А.С. Поповым измерение развивалось лишь в области постоянного тока и низкой частоты. Но уже в 1905 г. А.С. Попов предложил дифференциальный мостик для измерения малых емкостей, который был применен для учета влияния такелажа на работу судовых антенн. В этом же г. на заседании физического отделения Русского физико-химического общества он сделал доклад “Об определении длины волны и периода колебаний”, в котором сообщил об изобретенном им резонансном волномере.

С появлением измерительных приборов и развитием методов измерений возникла новая область науки - метрология - как наука о точных измерениях.

Большой вклад в развитие отечественной метрологии внес Д.И. Менделеев, возглавивший в 1893 г. Главную палату мер и весов, в задачи которой входило не только хранение эталонов и обеспечение поверки по ним средств измерений, но и проведение научных исследований в области метрологии. Стали создаваться местные поверочные палаты.

Основоположником отечественной радиоизмерительной техники признан академик М.В. Шулейкин, организовавший в 1913 г. первую заводскую лабораторию по производству радиоизмерительных приборов. Большой вклад в развитие радиоизмерений внесен академиком Л.И. Мандельштамом, создавшим в начале XX века прототип современного электронного осциллографа.

Теоретической основой измерений является **метрология** - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Понятие «измерение» встречается в различных науках (математике, физике, химии, психологии, экономике и др.), но в каждой из них оно может толковаться по-разному. В данном учебном пособии рассматриваются только задачи, относящиеся к измерениям физических величин в области радиоэлектроники.

К ним относятся:

- измерение параметров деталей или элементов, из которых состоит измеряемый объект;
- измерение режимов отдельных деталей, узлов и всего измеряемого объекта;
- градуировка или проверка градуировки шкал различных приборов;
- снятие характеристик, определяющих свойства приборов и устройств;
- определение искажений сигналов при их прохождении через различные устройства;
- измерение параметров модулированных сигналов;
- измерение напряженности электромагнитных полей, как полезных, так и мешающих;
- нахождение неисправностей в радиотехнической аппаратуре и определение их характера.

Кроме того, сюда можно отнести погрешности измерений, способы их учета и уменьшения, оценку результатов измерения.

1 ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ

МЕТРОЛОГИИ

В любой науке недопустимо произвольное толкование применяемых терминов. Терминологию в области метрологии регламентирует ГОСТ 16263-70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения». Для каждого понятия устанавливается один стандартизованный термин, которому дается соответствующее определение.

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах их единства и способах достижения требуемой точности. В связи с этим можно сформулировать основные задачи метрологии: теоретические вопросы обеспечения единства измерений и достижения требуемой точности; установление обязательных правил, требований и организационных мероприятий, направленных на достижение этих целей.

Различают теоретическую и законодательную метрологию.

Теоретическая метрология включает в себя разработку и совершенствование теоретических основ измерений и измерительной техники, научных основ обеспечения единства измерений в стране. Она включает в себя следующие основные проблемы:

- развитие общей теории измерений и теории погрешностей, в том числе создание новых методов измерений и разработка способов исключения или уменьшения погрешностей;

- создание и совершенствование систем единиц физических величин;

- создание и совершенствование системы эталонов;

- создание и совершенствование научных основ передачи размеров единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений.

Законодательная метрология - раздел метрологии, включающий комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, требующие регламентации и контроля со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. Ее основные задачи:

- создание и совершенствование системы государственных стандартов, которые устанавливают правила, требования и нормы, определяющие организацию и методику проведения работ по обеспечению единства и точности измерений;

- организация и функционирование соответствующей государственной службы.

Целью измерения является определение размера величины, причем результат измерений должен выражаться числом.

Возможное рабочее описание термина «измерение», согласующееся с нашей интуицией, звучит так: «Измерение - это получение информации». Одним из наиболее существенных аспектов измерения является сбор информации. Это означает, что результат измерения должен описывать то состояние или то явление в окружающем нас мире, которое мы измеряем. Хотя получение информации очевидно, оно является лишь необходимым, но не достаточным для опре-

деления измерения: когда кто-то читает учебник, он накапливает информацию, но не выполняет измерения. Второй аспект измерения состоит в том, что оно должно быть избирательным. Оно может снабдить нас сведениями только о том, что мы хотим измерить (об измеряемой величине) но ничего не говорит ни об одном из многих других состояний или явлений вокруг нас. Третий аспект состоит в том, что измерение должно быть объективным. Исход измерения не должен зависеть от наблюдателя. Любой наблюдатель должен извлекать из измерений одну и ту же информацию и приходиться к одним и тем же выводам.

Измерение - это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, заключающихся в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей с целью получения значения этой величины (или информации о нем) в форме, наиболее удобной для использования.

Физическая величина – характеристика одного из свойств физического объекта, общая в качественном отношении для многих физических объектов (физических систем, их состояний и происходящих в них процессов), но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта.

Процесс измерения заключается в сравнении измеряемой величины с некоторым ее значением, принятым за единицу.

Результатом измерения является число, показывающее отношение значения измеряемой величины к единице измерения.

Единицей измерения называют физическую величину с числовым значением «1», принятую за основание для сравнения с величинами того же рода. Единицы измерения подразделяются на основные и производные. Для возможности сравнения результатов измерений, выполненных в разное время и в разных местах, система единиц устанавливается в законодательном порядке (ГОСТ 8.417-81 ГСИ). У нас принята Международная система единиц (СИ), построенная на семи основных единицах: метр, килограмм, секунда, ампер, кандела, кельвин, моль. На основе данных величин образованы производные единицы СИ (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Производные единицы СИ

Герц	Гц	Hz	s^{-1}
Ньютон	Н	N	$m \times kg \times s^{-2}$
Паскаль	Па	Pa	$m^{-1} \times kg \times s^{-2}$
Джоуль	Дж	J	$m^2 \times kg \times s^{-2}$
Ватт	Вт	W	$m^2 \times kg \times s^{-3}$
Кулон	Кл	C	$s \times A$
Вольт	В	V	$m^2 \times kg \times s^3 \times A^{-1}$
Фарада	Ф	F	$m^{-2} \times kg \times s^{-3} \times A^{-2}$

Ом	Ом	Ω	$\text{M}^2 \times \text{кг} \times \text{с}^{-2} \times \text{А}^{-2}$
Сименс	См	S	$\text{M}^{-2} \times \text{кг}^{-1} \times \text{с}^3 \times \text{А}^2$
Вебер	Вб	Wb	$\text{M}^2 \times \text{кг} \times \text{с}^{-2} \times \text{А}^{-1}$
Тесла	Тл	T	$\text{кг} \times \text{с} \times \text{А}^{-2}$

Окончание таблицы 1.1

Генри	Гн	H	$\text{M}^2 \times \text{кг} \times \text{с}^{-2} \times \text{А}^{-2}$
Люмен	лм	lm	кд \times ср
Люкс	лк	lx	$\text{M}^{-2} \times \text{кд} \times \text{ср}$
Беккерель	Бк	Bq	с^{-1}
Грэй	Гр	Gy	$\text{M}^2 \times \text{с}^{-2}$
Зиверт	Зв	Sv	$\text{M}^2 \times \text{с}^{-2}$

В технике связи широко применяется внесистемная логарифмическая единица децибел (дБ), при помощи которой определяются относительные значения усиления, ослабления, нелинейных искажений, неравномерности характеристик.

1 дБ равен $10 \lg$ отношения двух одноименных энергетических величин (мощности, энергии) при $P_1/P_2 = 10^{1/10} = 1,259$. Для «силовых» величин (напряжения, силы тока, напряженности поля) 1 дБ равен $20 \lg$ их отношения, если $U_1/U_2 = 10^{1/20} = 1,22$.

Для выражения количественного различия между одноименными величинами используют понятие **размер физической величины** - количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Размер величины существует объективно, независимо от того, знаем мы его или нет, можем его измерить или нет.

Размерность физической величины – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные, и с коэффициентом пропорциональности, равным единице.

Не всякая физическая величина может быть измерена, так как не всякая физическая величина допускает сравнение ее значений. Измеримой величиной может быть лишь такая, из определения которой следуют понятия «больше» и «меньше» и возможность сравнения значений. Очевидно, что измеряемая величина может принимать значение «0».

Большинство физических величин удовлетворяют этим требованиям. Например, масса, длина, индуктивность, сопротивление и т.д. Но такая величина, как твердость, для возможности осуществления измерения требует особого определения. Действительно, если судить о твердости по тому, оставляют ли царапины на испытуемом предмете последовательно алмаз, корунд, топаз, кварц, полевой шпат и т.д., как это принято в минералогии, то такое определение

твердости не содержит в себе необходимых элементов для осуществления измерения. Но определение Бринелля, согласно которому твердость оценивается по диаметру углубления в испытуемом предмете, получающегося при известных условиях, уже удовлетворяет требованиям измеримости.

Значение нуля для ряда случаев является условным. Например, при измерении степени нагретости тел мы вынуждены условиться о «начале отсчета» (нулевом значении) и, в сущности, измерять не температуру тела, а лишь условный температурный промежуток, разность температур.

Приведенное выше определение процесса измерения предполагает, что обязательным звеном этого процесса является единица измерения.

Все вышеизложенное предполагает узаконенность принятой терминологии и связанное с этим существование таких понятий, как единство измерений и единообразие средств измерений.

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Единообразие средств измерений - состояние средств измерений, характеризующееся тем, что они проградуированы в узаконенных единицах и их метрологические свойства соответствуют нормам.

Для организации обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений в стране создана метрологическая служба.

Метрологическая служба - сеть государственных и ведомственных органов и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений в стране. Эти органы осуществляют надзор за состоянием средств измерений и обеспечивают передачу размера единиц физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений.

Всякое измерение необходимо предварительно обдумать, составить план проведения измерений. В связи с этим в теории измерений вводится такое понятие, как **методика измерений**.

Методика измерений - детально намеченный распорядок процесса измерений при выбранной схеме и комплексе приборов, включающий правила, последовательность операций, количество измерений и т.д. Применительно к одной и той же схеме измерений и данному комплексу аппаратуры возможны различные методики, и наоборот, для проведения измерений по одной методике можно использовать различные схемы измерений и аппаратуру.

В процессе измерений или установки параметров источников сигналов оператор снимает **отсчеты или показания**.

Отсчет - это число, указываемое индикатором прибора. В стрелочных приборах отсчет - это число, написанное у деления шкалы, на котором установилась стрелка; в цифровых - число, наблюдаемое на передней панели в виде светящихся цифр; иногда отсчетом является число, написанное у деления лимба, находящегося против визирной линии.

Показание - физическая величина, соответствующая отсчету. Показание получается в результате умножения отсчета на переводной множитель.

Например, если отсчет по шкале вольтметра 20 В, переключатель «Множитель» установлен против отметки 0,1, то показание прибора будет 2 В.

2 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Информация, полученная в процессе измерений, называется **измерительной**.

По способу получения измерительной информации измерения делятся на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямое измерение - это измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных (например, измерение силы тока амперметром). Математически прямые измерения можно записать элементарной формулой

$$Q = X, \quad (2.1)$$

где Q - искомое (истинное) значение физической величины;

X - значение физической величины, найденное путем ее измерения и называемое результатом измерения.

Косвенное измерение - измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Косвенные измерения выражаются следующей формулой:

$$Q = F(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (2.2)$$

где X_1, X_2, \dots, X_m - результаты прямых измерений величин, связанных известной функциональной зависимостью F с искомым значением измеряемой величины Q (например, при измерении сопротивления методом амперметра-вольтметра результатами прямых измерений являются напряжение и сила тока, а результатом косвенных измерений будет сопротивление, найденное по закону Ома).

Совокупные измерения - производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин (например, определение массы отдельных гирь набора по известной массе одной из них).

Совместные измерения - проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними (например, снятие вольт-амперной характеристики диода).

Совокупные измерения основываются на известных уравнениях, отражающих произвольное комбинирование величин, а совместные - на уравнениях, отражающих существование связи между измеряемыми величинами.

Если измеряемая величина остается в процессе измерений постоянной, измерения называются **статическими**, если изменяется - **динамическими**. Динамические измерения могут быть **непрерывными** (если технические средства позволяют непрерывно следить за значениями измеряемой величины) и **дискретными** (если значения измеряемой величины фиксируются только в отдельные моменты времени).

По способу выражения результатов измерения подразделяются на абсолютные и относительные.

Абсолютное измерение - измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Результат измерений выражается непосредственно в единицах физической величины.

Относительное измерение - измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную (например, определение коэффициента усиления как отношения напряжений на входе и выходе устройства). Величина, полученная в результате относительных измерений, может быть или безразмерной, или выраженной в относительных логарифмических единицах (бел, октава, декада) и других относительных единицах.

В зависимости от условий, определяющих точность результата, измерения делятся на три класса:

1) измерения максимальной возможной точности, достижимой при существующем уровне техники:

- эталонные (достигается максимально возможная точность воспроизведения размера физической величины);
- измерения физических постоянных;
- астрономические;

2) контрольно-поверочные измерения - измерения, погрешность которых не должна превышать некоторого заданного значения. Для таких измерений применяются образцовые средства измерений, а сами измерения осуществляются в специальных лабораториях;

3) технические (рабочие) измерения - измерения, в которых погрешность результата измерения определяется характеристиками средства измерения. Средства измерений, применяемые для этой цели, называются рабочими.

В свою очередь, технические измерения подразделяются на **эксплуатационные**, применяемые для контроля действующей аппаратуры и выполняемые типовыми измерительными приборами заводского изготовления; **производственные**, проводимые в цехах и служащие для измерения параметров деталей, из которых собираются узлы и блоки аппаратуры; измерения режимов, устанавливаемых в блоках и узлах; снятия характеристик этих узлов и всего устройства в целом; измерения при монтаже, наладивании и настройке; измерения в приемосдаточных испытаниях готовых изделий, установок и объектов и выполняемые в основном типовыми измерительными приборами; **лабораторные**, производимые при научных исследованиях и разработках новых систем, устройств и приборов.

3 КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Средство измерений - техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, раз-

мер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

По своему техническому и метрологическому назначению, согласно ГОСТ 16263-70 ГСИ, средства измерений подразделяются следующим образом:

- **меры** - средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера;

- **измерительные приборы** - средства измерений, предназначенные для получения измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем;

- **измерительные преобразователи** - средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейших преобразований, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Кроме того, совокупность различных средств измерений может образовывать:

- **измерительные установки** - совокупность расположенных в одном месте и функционально объединенных друг с другом средств измерений, предназначенных для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем;

- **измерительные системы** - совокупность средств измерений, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

По метрологическому назначению средства измерений подразделяются следующим образом:

- **эталоны** - средства измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающие определение, воспроизведение и хранение единицы физической величины с целью передачи размера единицы физической величины образцовым, а от них рабочим средствам измерений и утвержденные в качестве эталона в установленном порядке;

- **образцовые средства измерений** - меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, имеющие высокую точность и предназначенные для поверки и градуировки по ним других средств измерений, в установленном порядке утвержденные в качестве образцовых;

- **рабочие** - средства измерений, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

4 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения базируются на определенных принципах.

Принцип измерения - совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Метод измерения - совокупность использования принципов и средств измерений.

Различают два основных метода измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения.

Метод непосредственной оценки - метод измерения, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Иногда этот метод называют методом прямого преобразования.

Метод сравнения - метод измерения, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Метод сравнения может реализовываться в следующих модификациях:

- **нулевой метод** (компенсационный) - метод, при котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля;

- **дифференциальный метод** - метод, при котором формируют и измеряют разность измеряемой и известной величины, воспроизводимой мерой;

- **метод совпадений** - метод, при котором разность измеряемой и известной величины измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов;

- **метод противопоставления** - метод, при котором измеряемая и известная величины одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

В зависимости от метода измерений и свойств применяемых средств измерений все измерения могут выполняться либо с однократными, либо с многократными наблюдениями.

Здесь уместно также дать определение наблюдения и алгоритма измерения.

Наблюдение - это единичная экспериментальная операция, результат которой - результат наблюдения - всегда имеет случайный характер.

Алгоритм измерения - предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение искомого значения физической величины.

5 КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Любое измерение всегда выполняется с некоторой погрешностью, которая вызывается несовершенством методов и средств измерений, непостоянством условий наблюдения, а также недостаточным опытом экспериментатора или особенностями его органов чувств.

Погрешность измерения - отклонение результата измерения X от истинного значения измеряемой величины Q : $\Delta = X - Q$.

Так как истинное значение физической величины Q на практике неизвестно, при расчетах применяют так называемое **действительное** значение X_d , найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что может быть использовано вместо него.

В зависимости от характера проявления погрешности имеют следующие составляющие:

- **случайная** погрешность - погрешность, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины (например, погрешность, возникающая в результате округления);

- **систематическая погрешность** - погрешность, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины (например, погрешность, появляющаяся из-за несоответствия действительного и номинального значения меры);

- **грубая** погрешность - погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях.

Все эти погрешности проявляются одновременно.

В зависимости от характера влияния на результат измерения различают следующие погрешности:

- **аддитивные** - погрешности, значения которых не зависят от значения измерительной величины;

- **мультипликативные** - погрешности, значения которых изменяются с изменением измеряемой величины.

Эти погрешности могут быть и систематическими, и случайными одновременно.

В зависимости от источника возникновения погрешности классифицируются следующим образом:

- **методические** - погрешности, возникающие из-за несовершенства методов измерений и обработки их результатов. Как правило, это систематические погрешности;

- **инструментальные (аппаратурные)** - погрешности, которые определяются погрешностями применяемых средств измерений;

- **внешние** - погрешности, обусловленные отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормальных значений (например, температуры, влажности, магнитных и электрических полей и т.д.). Эти погрешности носят систематический характер;

- **субъективные (личные)** - погрешности, обусловленные индивидуальными особенностями экспериментатора. Могут быть как систематическими, так и случайными.

6 ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешность средств измерений - это отличие показания измерительного прибора от действительного значения измеряемой величины. Она включает в себя в общем случае систематическую и случайную составляющие.

ГОСТ 8.009-84 ГСИ «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» предусматривает следующие показатели точности средств измерений:

- предел, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение допускаемой систематической составляющей погрешности;

- предел допускаемого среднеквадратического отклонения и автокорреляционная функция или спектральная плотность случайной составляющей погрешности.

Погрешности средств измерений могут быть представлены в следующих формах:

- **абсолютная погрешность** - разность между измеренным X и истинным Q значением измеряемой величины:

$$\Delta X = X - Q. \quad (6.1)$$

В этом случае в результат измерения вводится **поправка** - значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности:

$$-\Delta X = \eta_{\text{п}};$$

- **относительная погрешность** - отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины

$$\delta = (X / Q) \cdot 100 \% = (X / X_{\text{д}}) \cdot 100 \%. \quad (6.2)$$

Часто в технике измерений пользуются таким понятием, как **точность измерений** - характеристика качества измерения, отражающая близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Количественно это величина, обратная модулю относительной погрешности измерения:

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta}{Q} \right|^{-1} = \frac{1}{|\delta|}; \quad (6.3)$$

- **приведенная погрешность** - отношение абсолютной погрешности к некоторому нормирующему значению $X_{\text{Н}}$:

$$\gamma = (\Delta X / X_{\text{Н}}) \cdot 100 \%. \quad (6.3)$$

В данном случае $X_{\text{Н}}$ - условно принятая величина, которая может принимать различные значения в зависимости от типа шкалы. В случае, когда шкала прибора равномерна и «0» находится в начале шкалы (самый распространенный в технике измерений случай), в качестве $X_{\text{Н}}$ принимают предел измерения. Если «0» находится в середине равномерной шкалы, то в качестве $X_{\text{Н}}$ используют сумму модулей пределов измерения, а если шкала не имеет нуля (например, медицинский термометр), то нормирующее значение принимают равным разности модулей пределов измерения. Сложнее обстоит дело с неравномерными шкалами, т.е. такими шкалами, у которых одному и тому же промежутку соответствуют разные значения измеряемой величины. В этом случае за нормирующее значение принимают либо разность модулей пределов равномерных участков шкалы, либо длину шкалы в миллиметрах. Последний случай вносит определенные трудности, так как в этом случае значение измеренной физической величины необходимо привести к размерности длины.

Значения погрешностей устанавливаются для нормальных условий, т.е. таких условий применения средств измерений, при которых влияющие на процесс измерения величины имеют значения, указанные в соответствующих стан-

дартах на средства измерения данного вида. В качестве нормальных общепринятыми являются следующие условия: температура окружающей среды $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $(65 \pm 15) \%$, атмосферное давление $(100000 \pm \pm 4000) \text{ Па}$. На значение погрешности оказывают влияние также положение приборов, электромагнитные поля, стабильность внешних условий и т.д.

Погрешность, свойственная средствам измерения, находящимся в нормальных условиях, называется **основной** погрешностью.

Отклонение внешних условий от нормальных приводит к изменению погрешностей, и тогда возникает погрешность, называемая **дополнительной**.

Основная погрешность средства измерений нормируется заданием пределов допускаемой основной и дополнительной погрешностей, т.е. той наибольшей погрешностью средства измерений (без учета знака), при которой оно может быть признано годным и допущено к применению. Способы нормирования пределов допускаемых погрешностей измерения регламентируются ГОСТ 8.009-84 ГСИ и ГОСТ 8.401-80 ГСИ.

В зависимости от характера изменения погрешности в пределах диапазона, а также от условий применения средства измерения данного вида погрешности средств измерений нормируются следующим образом:

а) в виде абсолютной погрешности:

- одним значением $\Delta_{\text{п}} = \pm a$, где $a = \text{const}$, для аддитивной погрешности;

- $\Delta_{\text{п}} = \pm(a + bX_{\text{д}})$ для мультипликативной погрешности;

- таблицей $\Delta_{\text{п}}$ для разных уровней (или диапазонов);

б) в виде относительной погрешности:

- одним значением $\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X_{\text{д}}} \cdot 100\% = \pm q_{\text{п}}$ для аддитивной погрешности;

- значением $\delta_{\text{п}} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\text{к}}}{X_{\text{д}}} - 1 \right) \right]$ для мультипликативной погрешности,

где $X_{\text{к}}$ - конечное значение диапазона. Значения q , c , d выбираются из ряда

$$(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \times 10^n, \quad (6.5)$$

где $n = +1, 0, -1, -2, \dots$;

- если диапазон измерения включает ноль, то в этом случае относительная погрешность стремится к бесконечности, и основную погрешность средства измерения нормируют приведенной погрешностью $\gamma = \Delta_{\text{п}} / X_{\text{N}} \cdot 100\% = \pm r$.

В зависимости от пределов допускаемой погрешности все средства измерения делятся на **классы точности** (таблица 6.1).

Класс точности средства измерения - это обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность, значения которой устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Значение класса точности также выбирается из ряда (6.5).

Способ обозначения класса точности определяется формой выражения основной погрешности.

Таблица 6.1 - Примеры обозначения класса точности

Δ	$\Delta_{\text{п}} = \pm a; \Delta_{\text{п}} = \pm(a + bX_{\text{д}})$	C	Значение указывается в нормативно-технической документации
	Таблицы, графики	IV A ₂	
δ	$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{X_{\text{д}}} \cdot 100 \% = \pm q$	2,0	$\delta = \pm 2,0 \%$
	$\delta_{\text{п}} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\text{к}}}{X_{\text{д}}} - 1 \right) \right]$	0,02/0,01	c=0,02 % d=0,01 %
	Таблицы, графики	D G ₁ III	Указывается в нормативно-технической документации
γ	X_{N} выражено в единицах измеряемой величины	2,5	$\gamma = \pm 2,5 \%$
	X_{N} выражено в длине рабочей части шкалы	0,5	$\gamma = \pm 0,5 \%$

7 СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1 Классификация систематических погрешностей

Систематическими называются погрешности, не изменяющиеся с течением времени или являющиеся не изменяющимися во времени функциями определенных параметров. Их отличительный признак состоит в том, что они могут быть предсказаны и, следовательно, почти полностью устранены введением соответствующих поправок.

Систематические аддитивные погрешности, например, могут возникать от постороннего груза на чашке весов, от неточной установки прибора на «0» перед измерением, от термо ЭДС в цепях постоянного тока. Для их устранения в приборах имеется корректор нуля. Систематические мультипликативные погрешности - это, например, изменение коэффициента усиления усилителя, изменение жесткости мембраны датчика манометра или пружинки прибора, опорного напряжения на цифровом вольтметре.

В зависимости от причин возникновения систематические погрешности подразделяются на инструментальные, внешние, личные, а также погрешности метода.

Инструментальные погрешности вызываются процессами старения тех или иных деталей аппаратуры (разрядка источников питания; старение резисторов,

конденсаторов; деформация механических деталей, усадка бумажной ленты в самопишущих приборах и т.д.). Их особенность состоит в том, что они могут быть скорректированы введением соответствующей поправки лишь в заданный момент времени, а далее вновь непредсказуемо возрастают. Вследствие этого требуется непрерывное повторение коррекции, тем более частое, чем меньше должно быть их остаточное значение.

По характеру проявления систематические погрешности делятся на постоянные и переменные.

Постоянные систематические погрешности в процессе измерения не изменяют величину и знак, а поэтому их очень трудно обнаружить в результатах измерений. Внешне они себя никак не проявляют и могут долгое время оставаться незамеченными. Единственный способ их избежать - это проверка прибора путем повторной аттестации по образцовым мерам или сигналам.

Переменные систематические погрешности или монотонно изменяют свою величину (прогрессивные погрешности), или меняются периодически (периодические погрешности). Все остальные виды систематических погрешностей принято называть погрешностями, изменяющимися по сложному закону.

Наличие систематических погрешностей искажает результаты измерений. Их отсутствие определяет **правильность измерений (или правильность средств измерений)**.

Правильность измерений (средств измерений) - качество измерений (средств измерений), отражающее близость к нулю систематических погрешностей.

Задача обеспечения правильности измерений - это обнаружение систематических погрешностей с последующей их полной или частичной компенсацией.

7.2 Обнаружение систематических погрешностей

Основная трудность - обнаружение систематических погрешностей и определение их величины и знака. Необходимо проводить специальные экспериментальные исследования. Часто пользуются графиком последовательности значений случайных отклонений результатов наблюдений, содержащих систематические погрешности, от средних арифметических. Суть этого эксперимента состоит в следующем. Находят n результатов измерений X_1, X_2, \dots, X_n , их

среднее значение $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ и отклонения результатов измерений от их

среднего значения $V_i = X_i - \bar{X}$. На основании этих данных строится график последовательности V_i в зависимости от номера наблюдений. Вид графика зависит от характера систематической погрешности.

Если V_i резко изменяется при изменении условий наблюдений (рисунок 7.1), то данные результаты содержат постоянную систематическую погрешность, зависящую от условий наблюдений. Из анализа графика следует, что первые четыре точки получены в одних условиях (одним прибором), остальные шесть - в

других. Следовательно, какой-то из приборов вносит постоянную систематическую погрешность.

Если V_i монотонно убывает (рисунок 7.2), то это означает, что в результатах измерения присутствует прогрессивная убывающая систематическая погрешность. Этот способ обнаружения пригоден в случае, когда случайные составляющие погрешности намного меньше систематических. Кроме того, графики позволяют только обнаружить систематическую погрешность, не давая сведений об ее значении. Количественная оценка ее находится по результатам специальных исследований, методика проведения которых зависит от характера эксперимента и источников погрешностей. Например, если поверка прибора проводилась по образцовой мере, то измерение разности между средним значением измеряемой величины и значением меры производится с точностью, определяемой погрешностью аттестации меры и случайными погрешностями измерения. Это будет постоянная составляющая систематической погрешности измерения.

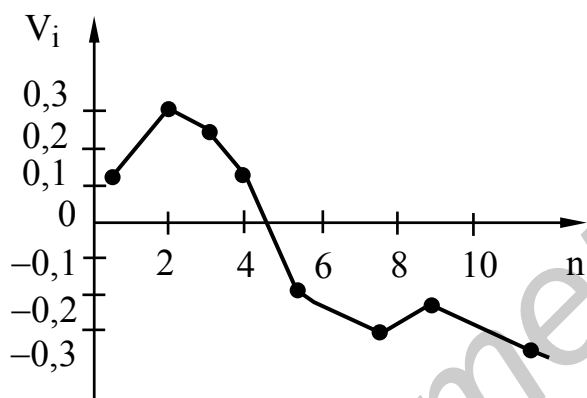


Рисунок 7.1

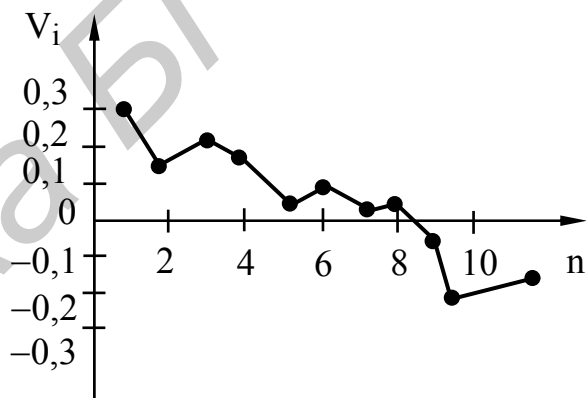


Рисунок 7.2

7.3 Способы уменьшения систематических погрешностей и введение поправок

7.3.1 До начала измерений необходимо

- тщательно устанавливать нули и проводить калибровку (например, калибровку развертки осциллографа с помощью кварцевого калибратора длительности);
- проверять рабочие средства измерений с определением абсолютного значения и знака систематической погрешности (поправок);
- прогревать приборы в течение времени, указанного в инструкции по эксплуатации;
- при сборке схем применять короткие соединительные провода, особенно при измерениях на высоких частотах;
- правильно размещать измерительные приборы. При этом следует обращать внимание на установку приборов в рабочее положение (вертикальное или горизонтальное, в соответствии со знаками, нанесенными на корпусе приборов) и на

взаимное положение приборов, исключаящее связь между ними через электромагнитное поле; удалить их от нагретых предметов, сильных источников электрических и магнитных полей;

- применять экранировку и термостатирование приборов.

7.3.2 В процессе измерений устранить систематические погрешности или отдельные их составляющие можно следующими способами:

- способ замещения. В данном случае измеряемая величина замещается образцовой мерой, находящейся в тех же условиях, что и измеряемая величина;

- способ компенсации погрешности по знаку. В этом случае измерение или отсчет измеряемой величины производятся дважды, так чтобы не известная по величине, но известная по природе погрешность входила в результат с противоположными знаками. Полусумма отсчетов свободна от систематических погрешностей. В качестве примера можно привести способ устранения погрешности частотомера, возникающей из-за наличия люфта механизма перестройки, когда перестройка осуществляется один раз со стороны меньших делений отсчетной шкалы, а второй - со стороны больших делений;

- способ симметричных наблюдений. Измерения проводят последовательно через одинаковые интервалы изменения аргумента. За окончательный результат принимается среднее значение любой пары симметричных наблюдений относительно середины интервала измерений. Так часто производится измерение температуры, времени, давления и т.п.;

- способ рандомизации, т.е. перевод систематических погрешностей в случайные. Пусть имеется n однотипных приборов с систематическими погрешностями одинакового происхождения. От прибора к прибору погрешность меняется случайным образом. Следовательно, можно произвести измерения разными приборами и усреднить результаты измерений.

7.3.3 После проведения измерений: при обработке результатов могут быть исключены систематические погрешности с известными значениями и знаками. Для этого в неисправленные результаты наблюдений вводятся поправки q или поправочные множители. Результаты измерений после внесения поправок называются **исправленными**

Поправка - это значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины для исключения систематической погрешности:

$$q = -\Delta_c; \quad X = X' + q. \quad (7.1)$$

Поправочный множитель - число, на которое умножается результат измерения с целью исключения систематической погрешности:

$$X = \eta \cdot X'. \quad (7.2)$$

При этом необходимо помнить, что поправка исключает аддитивную систематическую погрешность, а поправочный множитель - мультипликативную. Поправка и поправочный множитель определяются при поверке или специальными исследованиями.

7.4 Суммирование неисключенных систематических погрешностей

Систематические погрешности, которые остаются в результатах измерения после проведения операций обнаружения, оценки и исключения, называются неисключенными систематическими погрешностями.

При определении границы результирующей неисключенной систематической погрешности ее отдельные составляющие рассматриваются как случайные величины. Если известно, что распределение составляющих неисключенной систематической погрешности нормальное, то

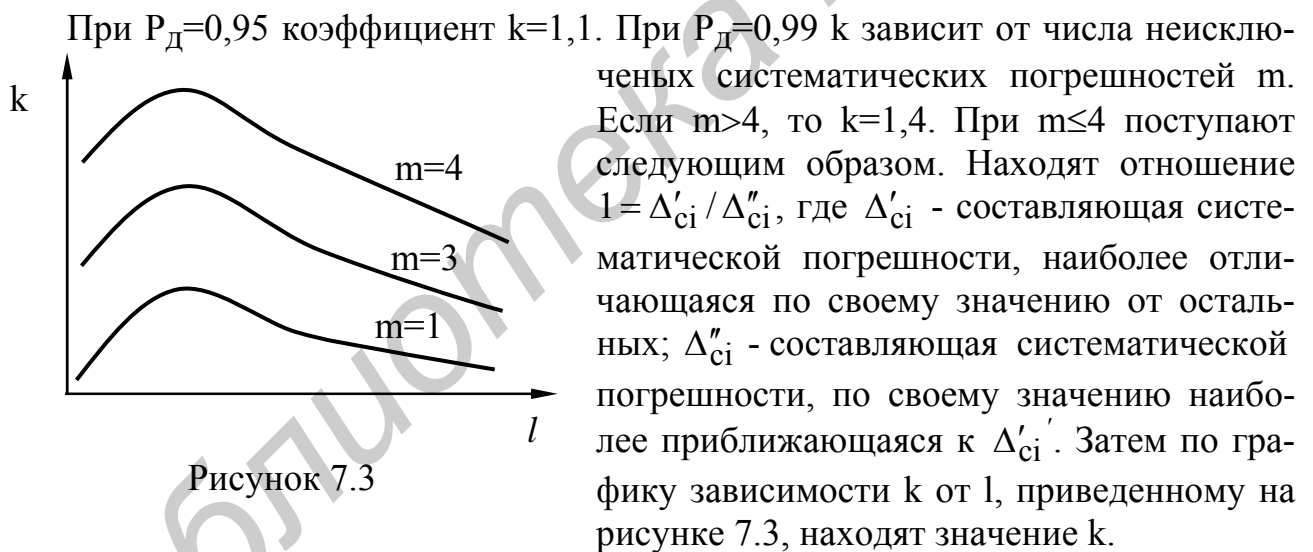
$$\Delta_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{ci}^2}, \quad (7.3)$$

где Δ_{ci}^2 - значение неисключенной составляющей систематической погрешности;

m - количество неисключенных систематических погрешностей.

Если данных о виде распределения нет, то

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{ci}^2}. \quad (7.4)$$



При косвенных измерениях неисключенные систематические погрешности суть частные неисключенные систематические погрешности косвенного измерения:

$$\Delta_{cx_i} = \frac{df}{dX_i} \Delta_{ci}. \quad (7.5.)$$

8 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вследствие того, что результат измерения X содержит случайную погрешность Δ , он сам является случайной величиной, так как $X=Q+\Delta$.

Основной характеристикой любой случайной величины является **функция распределения вероятностей**, которая устанавливает связь между возможными значениями случайной величины и вероятностями их появления при многократных измерениях.

Существуют две формы представления случайной величины: интегральная и дифференциальная.

Интегральной функцией распределения результатов наблюдения является функция $F(X)$ - вероятность того, что результат наблюдения окажется меньше некоторого текущего значения x : $F(X)=P\{X<x\}$. Это положительная неубывающая функция. Она имеет вид, представленный на рисунке 8.1.

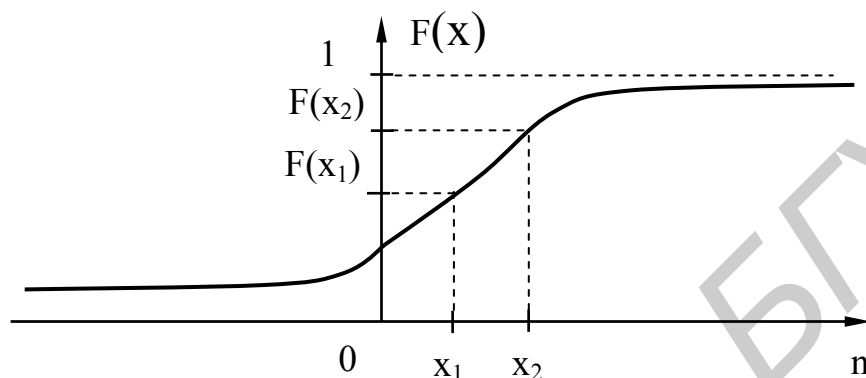


Рисунок 8.1

Основным свойством этой функции является следующее: вероятность того, что случайная величина принимает значения в интервале $\{x_1, x_2\}$, равна разности значений функции на концах интервала: $P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$.

Если $x_2 - x_1 = \Delta x$, то одинаковым приращениям Δx соответствуют различные значения приращения вероятности $\Delta F(x)$. Тогда плотность распределения вероятностей случайной величины, или плотность вероятностей, будет иметь следующий вид:

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x). \quad (8.1)$$

Это дифференциальная форма представления $F(x)$. В интегральной форме

$$F(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx. \quad (8.2)$$

Вероятность попадания случайной величины в интервал (x_1, x_2) будет равна интегралу от плотности распределения вероятности:

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (8.3)$$

Так как $\Delta = X - Q$, то переход от законов распределения вероятностей результатов наблюдений к законам распределения вероятностей погрешностей сво-

дится к замене x на Δ в вышеприведенных формулах.

9 СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

9.1 Источники возникновения случайных погрешностей

Случайными называются не определенные по своей величине и природе погрешности, в появлении которых не наблюдается какой-либо закономерности.

Случайные погрешности обнаруживаются при многократных измерениях искомой величины, так как результаты отдельных измерений отличаются друг от друга даже в тех случаях, когда повторные измерения проводятся одинаково тщательно и, казалось бы, при одних и тех же условиях. Другими словами, случайные погрешности неизбежны, и поэтому действительное значение X_d находится с некоторым приближением. К случайным погрешностям можно отнести, например, погрешности отсчета за счет параллакса (в приборах, не снабженных зеркальной шкалой). В зависимости от расположения глаза наблюдателя конец стрелки кажется расположенным над той или иной точкой шкалы, т.е. фактически полученный отсчет зависит от расположения глаза (рисунок 9.1).

Правильным отсчетом надо считать точку шкалы, на которую проецируется стрелка при условии, что луч зрения (от зрачка к стрелке) перпендикулярен плоскости шкалы. Следовательно, отсчет производится в точке a' , смещенной на некоторую величину по отношению к истинной точке a . В какую сторону и какой величины будет параллакс - зависит от случая. Но насколько в среднем велика погрешность - это зависит от конструкции прибора: чем меньше отношение расстояния h между стрелкой и шкалой к общей ширине шкалы, тем меньше будет в среднем погрешность. Следовательно, проектировщик обязан заранее учитывать ее и принимать конструктивные меры для уменьшения до допустимой величины.

К случайной относится также глазомерная погрешность, возникающая при определении на глаз доли деления. При конструировании обычно считают, что человек, имеющий необходимый навык, ошибается в отсчете на глаз не более чем на $1/10$ деления. Это при условии, что шкала удовлетворяет определенным требованиям:

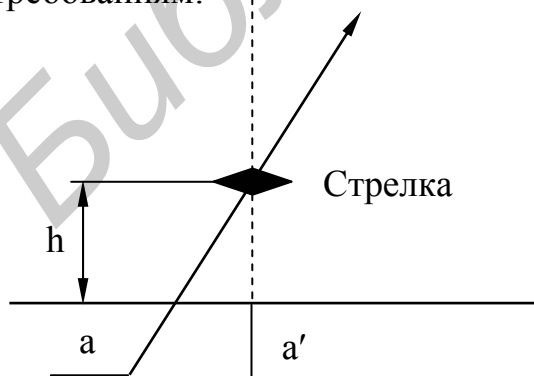


Рисунок 9.1

- 1) деления не слишком мелки - не менее 1,5 мм;
- 2) штрихи четкие, не размытые;
- 3) толщина штрихов и визирной черты или нити, толщина конца стрелки удобная; обычно рекомендуют толщину штриха около 0,15 мм;
- 4) цвет шкалы такой, чтобы штрихи четко выделялись;
- 5) в ночных условиях должно быть обеспечено достаточное освещение шкалы.

Погрешность (глазомерная или от параллакса), выраженная в процентах, будет тем меньше, чем крупнее шкала (т.е. чем меньше цена мелкого деления).

В качестве примера случайной погрешности можно также привести температурную погрешность, т.е. изменение показаний прибора в связи с тем, что окружающая температура отличается от нормальной, при которой была произведена градуировка шкалы. Для данного прибора можно заранее определить, на сколько изменяется показание при определенном повышении температуры. Следовательно, ее можно исключить путем учета поправки.

В большинстве случаев случайные погрешности нельзя исключить опытным путем, но их влияние на результат измерения может быть теоретически учтено применением при обработке результатов измерений теории вероятностей и математической статистики.

Нормальное распределение случайной погрешности (распределение Гаусса) подчиняется уравнению

$$P(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}, \quad (9.1)$$

где $P(\Delta)$ - вероятность получения погрешностей Δ (частота появления случайной погрешности Δ).

Функции распределения достаточно полно могут быть определены своими числовыми характеристиками, к которым относятся начальные и центральные моменты.

Начальным моментом k -порядка является математическое ожидание случайной величины степени k :

$$M[X^k] = \int_{-\infty}^{+\infty} X^k f(X) dX. \quad (9.2)$$

В большинстве случаев начальный момент 1-порядка совпадает с истинным значением измеряемой величины.

Центральный момент k -порядка - математическое ожидание k -й степени центрированной случайной величины (т.е. разности между значением случайной величины и ее математическим ожиданием). Применительно к измерениям центрированная случайная величина будет случайной погрешностью:

$$\Delta = X - M[X] = X - Q. \quad (9.3)$$

Центральным моментом 2-порядка будет дисперсия результатов наблюдений:

$$D[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 f(X) dX. \quad (9.4)$$

Это рассеяние результатов наблюдений относительно математического ожидания. Недостаток такого представления погрешности измерения заключается в том, что она имеет размерность квадрата измеряемой величины. Поэтому на практике используют значение среднеквадратичного отклонения результата измерения

$$\sigma(X) = \sigma_x = +\sqrt{D[X]}. \quad (9.5)$$

В отличие от результатов измерения, числовые характеристики функции распределения являются детерминированными, а не случайными. Следовательно, чтобы найти точные значения, необходимо произвести бесконечно большое число наблюдений. Отсюда возникает задача определения приближенных значений, полученных в некотором количестве независимых наблюдений. В математической статистике такие приближенные значения, выраженные одним числом, называются **точечными оценками**. Любая точечная оценка, вычисленная на основе опытных данных, представляет собой случайную величину, зависящую от самого оцениваемого параметра и от числа опытов. Распределение оценки зависит от распределения исходной случайной величины. Оценки классифицируются следующим образом:

- состоятельные, когда при увеличении числа наблюдений они приближаются к значению оцениваемого параметра;
- несмещенные, если математическое ожидание равно оцениваемому параметру;
- эффективные, если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки этого параметра.

9.2 Точечные оценки числовых характеристик измеряемой величины

Пусть имеется выборка из n измеряемых величин X_1, X_2, \dots, X_n . Результаты измерений содержат только случайные погрешности. Требуется найти оценку истинного значения измеряемой величины и параметр, характеризующий степень рассеяния наблюдений в данной выборке.

9.2.1 Оценка истинного значения измеряемой величины

При симметричных законах распределения вероятностей истинное значение измеряемой величины совпадает с ее математическим ожиданием, а оценкой математического ожидания является среднее арифметическое результатов отдельных наблюдений:

$$Q = M[X] \approx \bar{X} = \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) / n. \quad (9.6)$$

9.2.2 Оценка среднеквадратического отклонения (с.к.о.) результата наблюдений

Если известно математическое ожидание случайной величины, то с.к.о. равно

$$\sigma_x \approx \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - M[X])^2 \right] / n}. \quad (9.7)$$

Если математическое ожидание неизвестно, то по результатам выборочных наблюдений можно найти лишь оценку математического ожидания X . Это будет оценка состоятельная, но смещенная.

Несмещенная оценка будет иметь вид

$$\sigma_x \approx \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right] / n - 1}. \quad (9.8)$$

9.2.3 Оценка с.к.о. результата измерения

Полученная выше оценка истинного значения измеряемой величины X является случайной величиной, рассеянной относительно Q . С.к.о. будет иметь следующий вид

$$\delta_{\bar{x}} \approx \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right] / n(n-1)} \quad (9.9)$$

Эта величина характеризует рассеяние среднего арифметического значения X результатов n наблюдений измеряемой величины относительно ее истинного значения.

9.3 Оценка с.к.о. результата косвенного измерения

Все сказанное выше относится к оценке с.к.о. результата прямого измерения. Для оценки с.к.о. результата косвенного измерения поступают следующим образом. Пусть результат измерений представляет собой функцию от m переменных $Q = F(X_1, X_2, \dots, X_m)$. Находят частные погрешности результата измерения

$$E_{x_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta_{\bar{x}_i}, \quad (9.10)$$

где $\delta_{\bar{x}_i}$ - оценки с.к.о. результата прямого измерения i -й величины.

С.к.о. результата косвенного измерения находится по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m E_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^m E_{x_i} \cdot E_{x_j} \cdot R_{ij}}, \quad (9.11)$$

где R_{ij} - коэффициент корреляции, показывающий степень статистической связи между частными погрешностями измерения.

10 КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Изо всего многообразия методов и средств измерений рассмотрим только те, которые широко используются для измерения характеристик электрических сигналов и параметров радиотехнических цепей при контроле технического состояния различных радиоэлектронных устройств. Применяемые для этой цели средства измерений можно условно разделить на две группы: электромеханические и электронные измерительные приборы.

Электромеханические приборы состоят из относительно простой измерительной цепи и измерительного механизма.

Измерительная цепь - совокупность преобразовательных элементов, которая обеспечивает преобразование измеряемой величины в другую величину,

воздействующую на измерительный механизм (например, преобразует переменный ток в постоянный).

Измерительный механизм состоит из механических элементов (пружин, катушек, магнитов), взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение.

Электронные измерительные приборы - это электронные устройства: усилители, счетчики, дешифраторы, электронные ключи и т.д.

Каждый измерительный прибор имеет отсчетное устройство, которое позволяет производить отсчет измеряемой величины. Измерительная информация может быть представлена в аналоговой или цифровой форме. Следовательно, в зависимости от способа обработки и представления измерительной информации приборы делятся на аналоговые и цифровые.

В **аналоговых** измерительных приборах выходные сигналы, а следовательно, и показания являются непрерывными функциями изменения измеряемой величины.

В **цифровых** измерительных приборах вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме.

Электромеханические измерительные приборы классифицируются по многим признакам, большинство из которых содержится в условных обозначениях, наносимых на шкалы или корпуса приборов.

Электронные измерительные приборы по характеру измерений и виду измеряемых величин делятся на 20 подгрупп, которым присваиваются буквенные обозначения:

- А - приборы для измерения силы тока;
- В - приборы для измерения напряжения;
- Е - приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными;
- Р - приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными;
- М - приборы для измерения мощности;
- Ч - приборы для измерения частоты и временных интервалов;
- Ф - приборы для измерения фазовых сдвигов и группового времени запаздывания;
- С - приборы для наблюдения, измерения и исследования формы и спектра сигнала;
- Х - приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств;
- И - приборы для импульсных измерений;
- П - приборы для измерения напряженности поля и радиопомех;
- У - усилители измерительные;
- Г - генераторы измерительные;
- Д - аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений;
- К - комплексные измерительные установки;

- Л - приборы для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов;
- Ш - приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов;
- Э - измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов;
- Я - блоки радиоизмерительных приборов;
- Б - источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов.

Приборы в подгруппах разделяются по признакам основной выполняемой функции на виды, которым присваивается буквенно-цифровое обозначение, состоящее из обозначения подгруппы и номера вида (например, В2 - вольтметры для измерения постоянного напряжения, В3 - вольтметры для измерения переменного напряжения, В7 - универсальные вольтметры).

Приборы каждого вида по совокупности технических характеристик и очередности разработок разделяются на типы, которым присваивается порядковый номер модели. Полное обозначение прибора будет следующим: В7-27.

Для модернизированных приборов после цифры, обозначающей тип, ставятся в алфавитном порядке буквы, соответствующие очередной модернизации (В7-27А). Конструктивная, но не электрическая модификация обозначается порядковой цифрой после косой черты (В7-27А/1). При обозначении комбинированных приборов после буквы подгруппы ставится буква К (ФК2-18 - прибор для измерения фазовых сдвигов и параметров четырехполюсников). На приборах, предназначенных для эксплуатации в тропическом климате, после обозначения типа ставится буква Т (В7-27Т).

Назначение средства измерения оговаривается в полном его наименовании. Оно указывает, какую физическую величину измеряют или что воспроизводится с его помощью. Использование средства измерения не по прямому назначению может привести к получению ложных данных, повреждению самого средства измерения или участка схемы, к которому оно подключено. Следовательно, назначение средства измерения можно считать его метрологической характеристикой.

Область применения средства измерения - количественная характеристика. Она имеет вид системы неравенств, ограничивающей с одной или с обеих сторон диапазон измерения (воспроизведения). Она включает в себя диапазоны возможного изменения измеряемых или воспроизводимых физических величин; диапазоны допустимого изменения невоспроизводимых физических величин (амплитуды, частоты, формы, стабильности питающих напряжений); диапазоны допустимого изменения внешних условий; требования к согласованию средств измерений с внешними цепями.

В зависимости от формы представления показаний средства измерения классифицируются следующим образом:

- показывающие, т.е. допускающие только отсчет показаний;
- регистрирующие, т.е. допускающие не только отсчет, но и регистрацию показаний в форме диаграмм (самопишущие приборы) или распечатки в цифровой форме (печатающие приборы).

По условиям применения средства измерения классифицируются следующим образом:

- приборы общего применения, предназначенные для использования в различных радиоэлектронных устройствах независимо от их назначения;
- приборы специальные (сервисные), предназначенные для измерения параметров сигналов в определенных устройствах;
- встроенные приборы, входящие в состав радиоэлектронных устройств.

Проведенные работы по стандартизации позволили в последние годы создать измерительные приборы, которые могут использоваться как для общего применения, так и в качестве сервисных и встроенных. Например, электронные вольтметры, частотомеры, генераторы и другие приборы конструктивно выполняются в виде блоков, которые можно переносить или вставлять в стойки и создавать из отдельных модулей (блоков) измерительные устройства.

Вся совокупность измерительных приборов для электронных измерений условно разбивается на три группы:

- приборы для измерения параметров и характеристик электрических сигналов (амперметры, вольтметры, ваттметры, частотомеры, осциллографы);
- приборы для измерения параметров и характеристик электрических цепей (омметры, приборы для измерения емкости, индуктивности и др.);
- источники измерительных сигналов (измерительные генераторы).

По принципу действия различают:

- приборы прямого действия (преобразования);
- приборы сравнения (компенсационного преобразования).

Прибором прямого действия (рисунок 10.1) называется измерительный прибор, в котором происходит одно или несколько преобразований входного сигнала в одном направлении (т.е. без применения обратной связи). Тип индикаторного устройства ИУ определяется принадлежностью прибора к той или иной группе (аналоговые, цифровые, показывающие, регистрирующие). Измеряемая величина X последовательно преобразуется в величину X_n и затем отображается на индикаторном устройстве.

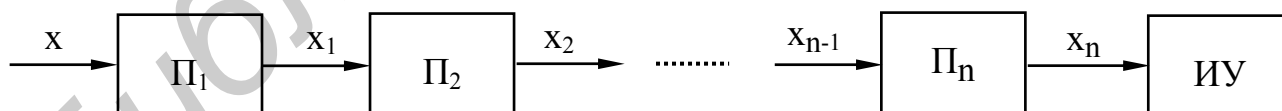


Рисунок 10.1

Прибором сравнения (рисунок 10.2) называется измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно.

Известная величина воспроизводится набором мер. Измеряемая величина подвергается прямому преобразованию в преобразователях Π_1, \dots, Π_n , и по цепи обратной связи сигнал X_n через Π_1', \dots, Π_n' управляет значением меры. В схеме сравнения измеряемый сигнал сравнивается со значением меры. При полной

компенсации в установившемся режиме $\Delta X = X - X_m = 0$. Изменением коэффициента преобразования цепи обратного преобразования добиваются нулевых показаний индикаторного устройства ИУ. Значение измеряемой величины будет X_m . Так реализуется **нулевой метод**. Если используется **дифференциальный метод**, то добиваются показаний индикаторного устройства $\Delta X = X - X_m$. При этом индикаторное устройство фиксирует ΔX , а измеряемая величина будет равна $X = X_m + \Delta X$.

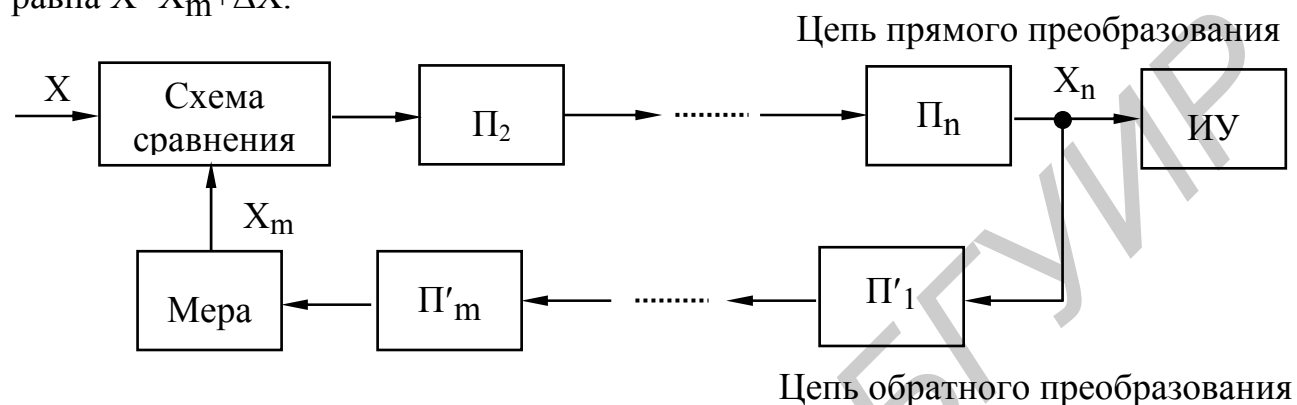


Рисунок 10.2

В зависимости от условий эксплуатации измерительные приборы делятся на полевые и лабораторные. Полевые приборы, как правило, применяются для работы на открытом воздухе и в сложных метеорологических условиях, обладают повышенной устойчивостью к механическим нагрузкам и температурно-влажностным колебаниям. Лабораторные измерительные приборы используются в закрытых помещениях с ограниченным спектром климатических и механических воздействий.

11 ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Характеристики средств измерений позволяют оценить свойства средства измерений и возможности его применения в заданных условиях эксплуатации. К ним относятся метрологические и технические характеристики.

Метрологические характеристики оказывают решающее влияние на результаты и погрешности измерений.

К основным метрологическим характеристикам относят следующие:

- чувствительность или цена деления шкалы;
- входной импеданс;
- вариация показаний;
- динамические характеристики;
- погрешности средств измерений;
- выходной код;
- число разрядов;

- цена единицы наименьшего разряда кода приборов с цифровым отсчетом.

Чувствительность измерительного прибора характеризует реакцию прибора на изменение сигнала на входе и равняется отношению изменения сигнала на выходе прибора $\Delta\alpha$ к вызывающему его изменению измеряемой величины ΔX :

$$S_n = \Delta\alpha / \Delta X . \quad (11.1)$$

Цена деления, или постоянная прибора, - это величина, обратная чувствительности:

$$C_n = 1/S_n . \quad (11.2)$$

Она равна значению физической величины, приходящемуся на одно деление шкалы.

Шкалы приборов могут быть равномерными и неравномерными. У равномерной шкалы одному делению шкалы соответствует одно и то же значение измеряемой величины. Если шкала неравномерна, то одному и тому же делению шкалы соответствуют разные значения измеряемой величины. У неравномерной шкалы обычно нормируется минимальная цена деления.

Иногда употребляют такое понятие, как **порог чувствительности (предельная чувствительность)** - наименьшее изменение входной величины, способное вызывать заметное изменение показаний прибора.

Входной импеданс ($Z_{вх}$) определяет влияние средства измерения на исследуемую схему. За счет потребления некоторой мощности средство измерения может изменить режим работы маломощного источника входного сигнала, что приводит к появлению погрешности измерения. Входной импеданс - величина комплексная.

Вариация показаний измерительного прибора (выходного сигнала измерительного преобразователя) - это разность показаний измерительного прибора, соответствующая данной точке диапазона измерений при двух направлениях медленного изменения параметра входного сигнала. Причиной вариации показаний является трение в опорах подвижной части измерительного механизма.

Такие характеристики, как выходной код, число разрядов кода, относятся к цифровым измерительным приборам.

Динамические характеристики - это характеристики инерционных свойств средства измерения. Они определяют зависимость параметров выходного сигнала средства измерения от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, нагрузки, внешних факторов - и нормируются передаточной функцией (характеризующей связь между входным и выходным сигналом), графиками амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, временем установления показаний или быстродействием (величиной, обратной времени установления показаний).

Время установления показаний прибора - промежуток времени с момента изменения измеряемой величины до момента установления показаний. Иногда вместо этого термина употребляют термин «время срабатывания». Время установления показаний зависит от системы прибора и его конструкции. Желательно, чтобы запаздывание между изменением измеряемой величины и моментом

установления показаний прибора было наименьшим. У приборов прямого преобразования «запаздывание» показаний прибора характеризуется так называемым **временем успокоения**.

Строго говоря, под временем успокоения следовало бы понимать тот промежуток времени, который проходит с момента изменения измеряемой величины до момента, когда стрелка займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины. Поэтому время успокоения можно определить следующим образом: это промежуток времени, прошедший с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель прибора не удаляется от окончательного положения более чем на 1% длины шкалы. Согласно стандарту, время успокоения для большинства типов приборов не должно превышать 4 с.

К **динамическим характеристикам** относятся также разрешающая способность, диапазон измеряемых величин, диапазон рабочих частот и диапазон влияющих величин.

Разрешающая способность - минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима прибором.

В техническом описании прибора обычно указывают параметры, которые можно объединить в группу количественных характеристик, определяющих область применения. Область применения характеризуется совокупностью трех групп физических величин: диапазона измеряемых величин; диапазона рабочих частот; диапазона влияющих величин.

Диапазон измеряемых величин - это минимальное и максимальное значения величин, которые могут быть измерены с заданной точностью.

Диапазон рабочих частот - полоса частот, в пределах которой возможна эксплуатация прибора или измерения производятся с погрешностью, не превышающей заданную величину.

Диапазон влияющих величин - это диапазон внешних величин, от которых могут зависеть показания приборов (температуры, внешних полей, ускорений и т.д.).

При выходе за пределы диапазонов, определяющих область применения средства измерения, измерения становятся вообще невозможными или осуществляются с погрешностью, превышающей допустимую для данного средства измерения.

В технической документации каждого средства измерения указывается его назначение, т.е. основные функции средства измерения и область его применения. Характеристика назначения средства измерения может включать в себя предельные значения неинформативных параметров и рабочие условия применения средства измерения.

Надежность измерительного прибора - количественная характеристика, определяющая способность прибора выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки в определенных режимах и услови-

ях эксплуатации. Надежность может быть установлена одним из следующих показателей:

- минимальным значением вероятности безотказной работы на заданное время;
- минимальным значением наработки до первого отказа, или минимальным значением наработки на отказ (не менее 1000 часов);
- минимальным значением параметра потока отказов;
- максимальным значением интенсивности отказов.

Метрологическая надежность - вероятность нахождения основных метрологических характеристик и в первую очередь погрешности в допустимых пределах в течение определенного времени.

Надежность средства измерения характеризуется показателями безотказности (наработка на отказ не менее 1000 часов), долговечности (средний срок службы более 8 лет или средний ресурс более 5000 часов) и ремонтпригодности (среднее время восстановления работоспособности прибора от 10 минут до 96 часов).

Гарантийный срок эксплуатации не должен быть менее 18 месяцев со дня ввода средства измерения в эксплуатацию.

В зависимости от значений влияющих величин, характеризующих климатические и механические воздействия в рабочих условиях применения, а также предельные условия транспортирования, средства измерения делятся на семь групп. С увеличением номера группы условия применения ужесточаются.

В нормативно-технической документации содержатся требования к электропитанию, времени установления рабочего режима и продолжительности непрерывной работы, к электрической прочности и сопротивлению изоляции, а также требования безопасности.

Принцип действия прибора, область применения, рабочее положение прибора, классы точности, прочность изоляции и другие метрологические и технические характеристики обозначаются на корпусе прибора с помощью специальных обозначений, регламентированных ГОСТ 23217-78 «Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения».

12 ВЫБОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

12.1 Планирование измерений

Процесс решения любой измерительной задачи разбивается на три этапа:

- подготовка измерений - планирование измерительного эксперимента и создание всех необходимых предпосылок для эксперимента, направленного на получение измерительной информации;
- проведение измерений - экспериментальное определение результатов наблюдений;
- обработка измерительной информации с целью получения результата измерения.

Цель измерения состоит в получении информации о количественных характеристиках или параметрах устройства для оценки его состояния или поведения при проектировании, производстве, испытаниях и эксплуатации. Иными словами, цель эксперимента - определение размера физической величины.

Несмотря на большое разнообразие измерительных задач, их решение обычно складывается из определенной последовательности операций, начиная с постановки задачи и кончая получением результатов измерений.

Задача формулируется с учетом конечной цели измерений, определяющей назначение, условия получения и способы использования измерительной информации, и только после этого планируется процедура измерений, включающая:

- построение или выбор модели объекта измерения;
- определение наилучшего плана проведения эксперимента;
- выбор вида измерения (прямое, косвенное и т.д.);
- выбор средств измерения;
- учет условий, в которых выполняются измерения;
- учет взаимодействия объекта измерения со средствами измерения.

Измерения всегда базируются на априорной (известной до опыта) информации. На основе априорных данных строят или выбирают физическую или математическую модель объекта измерения. Это важный этап, так как ошибки, допущенные на этом этапе, в дальнейшем невозможно исправить. В ходе измерений модель объекта можно лишь уточнить, например, путем предварительных измерений. Несоответствие реального объекта приписываемой ему модели служит источником методической погрешности.

Одной из основных задач планирования измерений является выявление взаимосвязей между входными и выходными параметрами объекта и представление их в количественной форме в виде математической модели (рисунок 12.1).

На рисунке 12.1 x - внешнее воздействие; y - реакция системы; w - возмущающие воздействия (случайные).

Математическая модель представляет собой совокупность уравнений, условий и алгоритмических правил и позволяет анализировать и проектировать объекты, а также управлять ими.

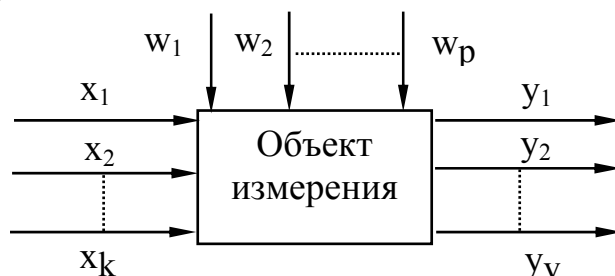


Рисунок 12.1

Входные параметры, которые влияют на объект и могут быть измерены, называются **факторами**.

При **пассивном** эксперименте исследователь не имеет возможности воздействовать на объект, поэтому задача определения наилучшего плана эксперимента сводится к оптимальной организации пассивного сбора информации и включает в себя такие вопросы, как выбор интервалов времени между моментами измерений, задание числа выполняемых измерений, определение метода обработки результатов и т.д. Для решения указанных вопросов используют известные методы обработки результатов измерений.

В отличие от пассивного эксперимента **активный** связан с воздействием на ход процессов в изучаемом объекте и с возможностью выбора в каждом опыте тех уровней факторов, которые представляют интерес. Если какой-либо существенный фактор окажется неучтенным, то это может привести к значительному повышению погрешности эксперимента. С другой стороны, увеличение числа рассматриваемых факторов приводит к значительному возрастанию числа опытов, поэтому следует воспользоваться методами отсеивания несущественных факторов.

Методы планирования многофакторного эксперимента, в котором необходимо учитывать влияние многих независимых переменных, предполагают изменение всех факторов сразу, а не изучение влияния каждого из них в отдельности, как при традиционных способах составления планов. Такое многофакторное планирование более эффективно и позволяет значительно уменьшить погрешности определения интересующих экспериментатора величин.

Построение плана эксперимента сводится к выбору экспериментальных точек, симметричных относительно основного (нулевого) уровня, которым является исходная точка в многомерном факторном пространстве. Для этого для каждого фактора выбирают два крайних уровня, между которыми они будут варьироваться в ходе эксперимента.

После выделения параметров и характеристик объекта выбирают виды их измерений в зависимости от возможности реализации, а также от требуемой точности. При проведении измерений средства измерений взаимодействуют с объектом измерений. При этом объект и средства измерений влияют друг на друга, что может привести к некоторому изменению свойств объекта и показаний измерительного прибора. Так, входное сопротивление подключаемого средства измерения может существенно влиять на режим работы объекта и привести к погрешности в результатах измерений. При измерениях в цепях переменного тока следует учитывать влияние на объект не только активной составляющей входного сопротивления средства измерений, но и реактивной. На режим работы объекта и, следовательно, на результат измерений особенно сильно воздействуют емкостные составляющие входного сопротивления электронных осциллографов и вольтметров. Подключение вольтметра к колебательному контуру приводит к снижению частоты резонанса контура за счет входной емкости вольтметра, к снижению добротности контура за счет шунтирующего действия активной составляющей входного сопротивления этого прибора.

Стандартные методики измерений учитывают всевозможные источники погрешностей измерений, регламентируют последовательность действий, обеспечивающих наименьшую погрешность измерений. При отсутствии стандартной методики производят аттестацию методики измерений, в ходе которой определяют сначала составляющие погрешности измерений, а затем и суммарную погрешность, значение которой и приписывают данной методике.

12.2 Выбор средств измерений

Правильный выбор средств измерений является необходимым условием получения достоверной измерительной информации. Поэтому основное внимание при выборе средств измерений для решения данной измерительной задачи уделяют обеспечению необходимой точности измерений в динамическом и частотном диапазонах изменения измеряемых параметров технических устройств. Одновременно учитывают и условия, в которых планируется использовать средства измерения, а также допустимую продолжительность измерения.

При анализе условий определяются

- уровни механических воздействий на средства измерения (вибрации, удары, линейные ускорения);
- значения климатических факторов (температура, влажность, атмосферное давление);
- наличие активной разрушающей среды, к воздействию которой не приспособлен прибор (агрессивные газы и жидкости, грибки);
- наличие сильных магнитных и электрических полей и защиты от них у выбираемых средств измерений.

В простых измерительных задачах, заключающихся в определении значений параметров несложных устройств, вопросы выбора и применения средств измерений решают, как правило, эвристически, на основе практического опыта. В этом случае рекомендации носят общий характер и сводятся к необходимости проверки следующих условий:

- средство измерений должно обеспечивать измерение параметров устройств с необходимой точностью, быстродействием, в заданном диапазоне значений измеряемой физической величины, в определенных условиях окружающей среды (при фиксированном уровне внешних факторов);
- средства измерений должны быть приемлемыми по стоимости, эргономическим, массогабаритным и другим характеристикам.

Первоначально определяют типы средств измерений, пригодные по своему функциональному назначению, диапазонам измеряемых физических величин, стойкости к внешним воздействующим факторам, массогабаритным характеристикам.

После того как выбраны измерительные приборы, пригодные для указанных в измерительной задаче условий, необходимо правильно оценить, какой из них обладает наименьшей избыточностью по точностным характеристикам. Стремление произвести измерения с большей, чем это необходимо, точностью приво-

дит к удорожанию измерений. В то же время снижение требований к точности ухудшает достоверность результатов измерений и обесценивает их.

Известные подходы к выбору средств измерений по точности основаны на рассмотрении двух различных случаев их использования:

- 1) для измерения параметров устройств;
- 2) для контроля параметров устройств.

В первом случае достигается значение предела допускаемой погрешности измерения меньшее, чем требуется. Во втором случае средства измерений выбираются из условия, что вероятности ложного и (или) необнаруженного отказа контролируемого параметра не должны превышать допустимых значений. Таким образом, задача выбора измерительного прибора сводится к определению соотношения между требуемым пределом допускаемой погрешности измерения и допуском на контролируемый параметр.

Исходными данными, необходимыми при выборе средства измерения по точности, являются

- состав измеряемых и контролируемых параметров устройств;
- значения допусков на отклонения контролируемых параметров и допустимые значения суммарной погрешности определения измеряемых параметров;
- допустимые значения условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов для каждого из контролируемых параметров;
- законы распределения отклонений контролируемых параметров от своих номинальных значений.

12.3 Основные правила измерений

Об основных подходах к выбору средств измерений уже говорилось выше. К сказанному следует добавить следующее. Измерительные приборы выбираются на основании их технических характеристик в соответствии с измеряемой величиной, заданной точностью и диапазоном частот. Приборы должны оказывать малое влияние на работу исследуемых устройств. Наиболее часто значительные ошибки возникают из-за неправильного подбора приборов. Приборы должны быть исправны, поверены. Запрещается применение для измерений приборов с истекшим сроком поверки.

12.3.1 Составление схемы измерительной установки

При составлении схемы измерительной установки необходимо учитывать следующее:

- все приборы должны устанавливаться в правильное и устойчивое положение;
- соединительные провода должны иметь надежные контакты и хорошую изоляцию;
- приборы следует располагать так, чтобы удобно было производить отсчеты и манипулировать их органами настройки и управления;
- шкалы должны хорошо освещаться, должны быть приняты меры к устранению параллакса;
- при работе с высоковольтными установками необходимо установить ограждение;

- проводники должны быть как можно короче;
- располагать приборы следует так, чтобы исключить или свести к минимуму их влияние друг на друга.

12.3.2 Порядок проведения эксперимента

Необходимо заранее наметить порядок манипуляций и снятия отсчетов и строго его придерживаться во время измерений. Беспорядочные наблюдения имеют малую ценность. Излишняя торопливость также вредит делу. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений, особенно когда от их регулярности зависит исключение систематической погрешности. Если возникли сомнения в правильности полученных результатов, измерения необходимо произвести несколько раз.

12.3.3 Оформление результатов эксперимента

Достоверность измерений во многом зависит от качества ведения протокола. В протоколе должно быть отмечено следующее:

- род измерений и применяемый метод;
- время измерений;
- наименование и номера приборов;
- результаты эксперимента.

Отсчеты со шкал следует записывать в виде соответствующих таблиц и в такой форме, в какой они получены в процессе измерений. В протоколах должны быть отмечены все обстоятельства, которые могут оказать влияние на точность измерений.

Окончательные вычисления не следует накапливать или откладывать на долгий срок. Полезно часть их производить в процессе измерений. Бессистемные вычисления и измерения часто приводят к ошибкам результата, что затрудняет определение характера изменения изучаемого процесса, определение точности проведенных измерений и т.д.

В конечном счете качество измерений зависит от опыта экспериментатора, однако правила могут предохранить от грубых ошибок.

13 ПРАВИЛА ОКРУГЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТА НАБЛЮДЕНИЙ

Исходными данными для расчета являются нормируемые значения погрешности средства измерения, которые указываются всего с одной или двумя значащими цифрами. Следовательно, в окончательном значении рассчитанной погрешности должны быть оставлены одна-две значащие цифры. Например, если число 1,2 округляется до одной значащей цифры, то отбрасывание второго знака приводит к ошибке порядка 30-50%. И наоборот, если число 0,94 округлить до 0,9, то получается дезинформация, так как исходные данные не обеспечивают такой точности. В связи с этим приняты следующие правила округления значений:

1) погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной, если 3 и более;

2) результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение погрешности;

3) округление производится лишь в конечном ответе, а все предварительные вычисления проводятся с одним-двумя лишними знаками.

Недостатком этих правил является тот факт, что относительная погрешность от округления изменяется скачком при переходе, например, от числа 0,29 $[(0,30-0,29)/0,30=3\%]$ к числу 0,3 $[(0,4-0,3)/0,3=30\%]$. Следовательно, для устранения скачка относительной погрешности предлагается каждую декаду возможных значений округляемой погрешности делить на три части: от 0,1 до 0,2; от 0,2 до 0,5 и от 0,5 до 1,0 - и в каждой использовать свой шаг округления: 0,02; 0,05 и 0,1. Тогда ряд разрешенных к употреблению округленных значений погрешности получает вид 0,10-0,12-0,14-0,16-0,18-0,20-0,25-0,30-0,35-0,40-0,45-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0. Преимущество этого способа округления состоит в том, что погрешность от округления на границах участков изменяется лишь от 5 до 10%. Следовательно, последние цифры результат должны соответствовать приведенному ряду.

14 ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

14.1 Выбор размера графика

Нетрудно видеть, что определенному классу точности прибора соответствует определенный размер графика. Например, если прибор имеет класс точности 1,0, то наибольшая погрешность прибора составляет не более 0,01 от предела измерения. Следовательно, размер графика должен быть не более $2 \times 100 / 1,0 = 200$ мм (или, в крайнем случае, 160 мм).

Если же прибор имеет класс точности 2,5, то желательный размер графика будет $2 \times 100 / 2,5 = 80$ мм (но не менее 64 мм).

Если прибор имеет класс точности 0,5, то график должен иметь следующий размер: $2 \times 100 / 0,5 = 400$ мм (не менее 320 мм).

14.2 Выбор формы графика

Если график имеет большой размер, то пользоваться им неудобно. Если же уменьшить размер графика, то будет вноситься дополнительная погрешность. В данном случае рациональным будет график с перенесенным масштабом (рисунок 14.1), когда сетка переносится с осей непосредственно на график. Этим достигаются определенная компактность и удобство использования без внесения дополнительной погрешности.

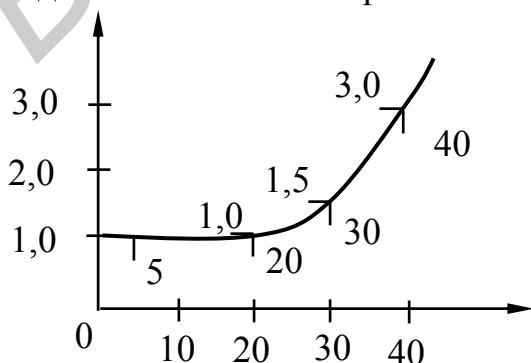


Рисунок 14.1

Для многопредельных приборов строят несколько кривых в разных масштабах.

Для приборов с высоким классом точности (0,01 и выше) существует два способа обеспечения удобства пользования не в ущерб точности. Первый - это замена графика число-

вой таблицей. Промежуточные значения величин при этом находят с помощью интерполяции.

Второй - это разбиение кривой на несколько отрезков и расположение их в одном месте (рисунок 14.2). Значения величин на концах каждого отрезка определяются на основании сверки с эталоном.

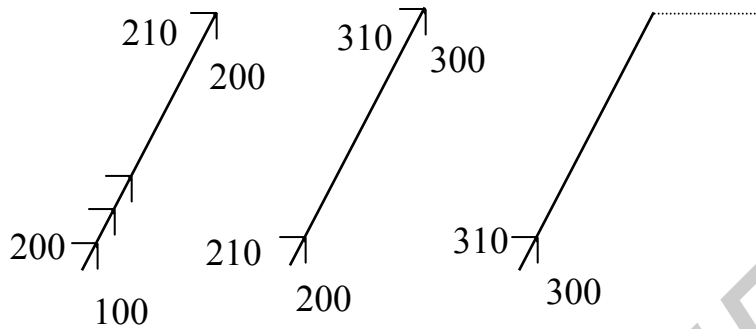


Рисунок 14.2

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения: Учебник для вузов. - Мн.: Выш. шк., 1986. - 320 с.
- 2 Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. - М.: Постмаркет, 2000. - 350 с.
- 3 Мирский Г.Я. Электронные измерения. Издание 4-е, перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1984. - 184 с.
- 4 Архипенко А.Г., Белошицкий А.П., Ляльков С.В. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие. В 3 ч. Ч.1. - Мн.: БГУИР, 1997.
- 5 Кузнецов В.А., Паньков А.Н., Подольский О.А. и др. Основы эксплуатации средств измерений. - М.: Радио и связь, 1984. - 184 с.
- 6 Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1987.