

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

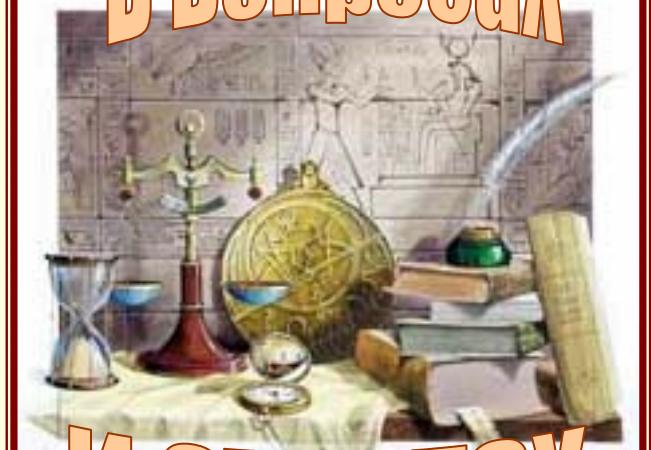
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

В.Д. Горбоконенко
В.Е. Шикина

Метрология

В Вопросах



И Ответах

Учебное пособие

Федеральное агентство по образованию
Ульяновский государственный технический университет

В. Д. ГОРБОКОНЕНКО, В. Е. ШИКИНА

МЕТРОЛОГИЯ

В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям 551100 и 654300 «Проектирование и технология электронных средств» и специальностям 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 220500 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств»

Ульяновск 2005

УДК 389 (075)

ББК 30.10 я7

Г67

Рецензенты: Кафедра радиоэлектроники Ульяновского филиала Военного университета связи (начальник кафедры КТН, доцент А. Дормидонтов; зам. начальника кафедры КТН В. Неижмак; ст. преподаватель кафедры КТН Д. Муратханов); директор Центра энергосбережения и сертификации Самарского государственного технического университета, доктор технических наук Ю.Н. Климочкин

Горбоконенко, В. Д.

Г67 Метрология в вопросах и ответах / В. Д. Горбоконенко, В. Е. Шикина. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 196 с.
ISBN 5 – 89146 – 530 – 0

Рассмотрены основные аспекты метрологии, касающиеся методов и средств обеспечения единства и точности измерений. Приведены термины, определения, понятия, зафиксированные в государственных, европейских и международных стандартах. Включены основные разделы теоретической метрологии: основные представления метрологии, системы физических величин и их единицы, принципы построения эталонов, виды средств измерительной техники, методы измерений, нормирование, определение метрологических характеристик и обработка результатов измерений. Пособие содержит справочные данные, примеры.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 200800, 220500, а также 190300 «АП и ИВК» и 071900 «Информационные системы и технологии». Может быть полезно аспирантам и инженерно-техническим работникам.

УДК 389 (075)

ББК 30.10 я7

ISBN 5 – 89146 – 530 – 0

© В.Д. Горбоконенко,
В.Е. Шикина, 2005

© Оформление. УлГТУ, 2005

Учебное издание

ГОРБОКОНЕНКО Вера Дмитриевна
ШИКИНА Виктория Евгеньевна

МЕТРОЛОГИЯ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ
Учебное пособие

Редактор Н. А. Евдокимова

Подписано в печать 30.11.2004. Формат 60x84/16.
Бумага тип. №1. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 11, 40.
Уч.-изд. л. 12, 00. Тираж 100 экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.
Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ГЛАВА 1. Физические величины.....	6
1.1. Термины и определения.....	6
1.2. Основные вопросы для изучения темы.....	10
ГЛАВА 2. Единицы физических величин.....	22
2.1. Термины и определения.....	22
2.2. Основные вопросы для изучения темы.....	25
ГЛАВА 3. Принципы и методы измерения физических величин.....	43
3.1. Термины и определения.....	43
3.2. Основные вопросы для изучения темы.....	51
ГЛАВА 4. Погрешности измерений и обработка результатов.....	65
4.1. Термины и определения.....	65
4.2. Основные вопросы для изучения темы.....	75
ГЛАВА 5. Средства измерительной техники.....	99
5.1. Термины и определения.....	99
5.2. Основные вопросы для изучения темы.....	106
ГЛАВА 6. Параметры и свойства средств измерительной техники.....	126
6.1. Термины и определения.....	126
6.2. Основные вопросы для изучения темы.....	129
ГЛАВА 7. Метрологические характеристики средств измерительной техники.....	136
7.1. Термины и определения.....	136
7.2. Основные вопросы для изучения темы.....	138
ГЛАВА 8. Эталоны и образцовые средства измерений.....	153
8.1. Термины и определения.....	153
8.2. Основные вопросы для изучения темы.....	158
ГЛАВА 9. Метрологическая служба.....	177
9.1. Термины и определения.....	177
9.2. Основные вопросы для изучения темы.....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	187
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	188
АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	190

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный мир насыщен измерениями; знания, не имеющие количественного выражения, теряют ценность.

Поль Валери

Измерения являются важным средством познания человеком природы и играют огромную роль в современном мире. Практически нет ни одной сферы деятельности человека, где бы интенсивно не использовались результаты измерений, испытания и контроля. Метрология является наукой об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Известно достаточно большое количество учебников и учебных пособий по метрологии, что в значительной степени затрудняет выбор. Кроме того, учитывая, что существуют тенденции замены действующих государственных стандартов на новые, отвечающие европейским и международным требованиям, возникла задача разработки учебного пособия, материал которого базируется на современной нормативно-технической документации и рекомендациях международных организаций в области метрологии. Предложен способ изложения материала в форме вопросов и ответов, что, на наш взгляд, облегчает усвоение и способствует более глубокому пониманию теоретического материала. Приведенная стандартизированная терминология упрощает процесс адаптации студентов к работе с научно-технической, патентной документацией и формирует их как современных специалистов.

Каждая глава данного пособия начинается с раздела «Термины и определения», который полностью основан на определениях, приведенных в межгосударственных Рекомендациях РМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения». Главы пособия содержат вопросы, которые, по мнению авторов, являются наиболее важными при изучении конкретной темы.

Предисловие

Каждый вопрос обозначается знаком



Знаком ➤ отмечаются примечания к определениям в разделе «Термины и определения».

Знаком отмечается информация, приведенная в качестве справочной.

Следует отметить, что «Метрология» является одной из важнейших научных дисциплин, присутствующих практически во всех учебных планах технических и экономических специальностей.

Предлагаемое учебное пособие может быть полезно широкому кругу лиц, изучающих или работающих в области прикладной и теоретической метрологии.

ГЛАВА 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

1.1. Термины и определения

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

➤ В «Международном словаре основных и общих терминов метрологии» (VIM-93) применено понятие *величина (измеримая)*, раскрываемое как «характерный признак (атрибут) явления, тела или вещества, которое может выделяться качественно и определяться количественно».

Измеряемая физическая величина – физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи.

Размер физической величины – количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Значение физической величины – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Числовое значение физической величины – отвлеченное число, входящее в значение величины.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

➤ Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Физический параметр – физическая величина, рассматриваемая при измерении данной физической величины как вспомогательная.

➤ При оценивании качества продукции нередко применяют выражение *измеряемые параметры*. Здесь под параметрами, как правило, подразумевают физические величины, обычно наилучшим образом отражающие качество изделий или процессов.

Влияющая физическая величина – физическая величина, оказывающая влияние на размер измеряемой величины и (или) результат измерений.

Система физических величин – совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин.

➤ В названии системы величин применяют символы величин, принятых за основные. Так система величин механики, в которой в качестве основных приняты длина L , масса M и время T , должна называться системой LMT. Система основных величин, соответствующая Международной системе единиц (СИ), должна обозначаться символами LMTIΘNJ, обозначающими соответственно символы основных величин – длины L , массы M , времени T , силы электрического тока I , температуры $Θ$, количества вещества N и силы света J .

Основная физическая величина – физическая величина, входящая в систему и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы.

Производная физическая величина – физическая величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы.

➤ Примеры производных величин механики системы LMT: скорость v поступательного движения, определяемая (по модулю) уравнением $v = dl/dt$, где l – путь, t – время; сила F , приложенная к материальной точке, определяемая (по модулю) уравнением $F = ma$, где m – масса точки, a – ускорение, вызванное действием силы F .

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 с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

➤ Степени символов основных величин, входящих в одночлен, в зависимости от связи рассматриваемой физической величины с основными, могут быть целыми, дробными, положительными и отрицательными. Понятие размерность распространяется и на основные величины. Размерность основной величины в отношении самой себя равна единице, то есть формула размерности основной величины совпадает с ее символом.

В соответствии с международным стандартом ИСО 31/0, размерность величин следует обозначать знаком dim . В системе величин LMT размерность величины X будет: $\text{dim } X = L^l M^m T^t$, где L, M, T – символы величин, принятых за основные (соответственно длины, массы, времени).

Показатель размерности физической величины – показатель степени, в которую возведена размерность основной физической величины, входящая в размерность производной физической величины.

➤ Показатели степени l, m, t называют показателями размерности производной физической величины X . Показатель размерности основной физической величины в отношении самой себя равен единице.

Размерная физическая величина – физическая величина, в размерности которой хотя бы одна из основных физических величин возведена в степень, не равную нулю.

➤ Сила F в системе LMT Θ NJ является размерной величиной.

Безразмерная физическая величина – физическая величина, в размерность которой основные физические величины входят в степени, равной нулю.

➤ Безразмерная величина в одной системе величин может быть размерной в другой системе. Например, электрическая постоянная ϵ_0 в электростатической системе является безразмерной величиной, а в системе величин СИ имеет размерность $\text{dim } \epsilon_0 = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$.

Уравнение связи между величинами – уравнение, отражающее связь между величинами, обусловленную законами природы, в котором под буквенными символами понимают физические величины.

➤ Уравнение $v = l/t$ отражает существующую зависимость скорости v от пути l и времени t .

Уравнение связи между величинами в конкретной измерительной задаче часто называют *уравнением измерений*.

Род физической величины – качественная определенность физической величины.

➤ Длина и диаметр детали – однородные величины. Длина и масса детали – неоднородные величины.

Аддитивная физическая величина – физическая величина, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга.

➤ К аддитивным величинам относятся длина, масса, сила, давление, время, скорость и др.

Неаддитивная физическая величина – физическая величина, для которой суммирование, умножение на числовой коэффициент или деление друг на друга ее значений не имеет физического смысла.

➤ Термодинамическая температура.

1.2. Основные вопросы для изучения темы

С какой целью вводится понятие «величина»? Классификация величин

Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины. Величина – это свойство чего-либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

На рис. 1.1 приведена классификация величин [4].



Рис. 1.1. Классификация величин

Величины можно разделить на реальные и идеальные. Идеальные величины главным образом относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий.

Реальные величины делятся, в свою очередь, на физические и нефизические. Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям). К нефизическим следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам – философии, социологии, экономике и т.д.

Физические величины целесообразно разделить на измеряемые и оцениваемые. Измеряемые физические величины могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования последних является важным отличительным признаком измеряемых физических величин. Физические величины, для которых по тем или иным

причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только оценены. Величины оценивают при помощи шкал.

Нефизические величины, для которых единица измерения в принципе не может быть введена, могут быть только оценены.

В каких случаях применение термина «величина» оправдано, а в каких нет?

Применение краткой формы термина «величина» вместо термина «физическая величина» допустимо только в том случае, когда из контекста ясно, что речь идет именно о физической величине, а не о математической.

Не следует применять термин «величина» для выражения только количественной стороны рассматриваемого свойства. Например, нельзя говорить или писать «величина массы», «величина площади», «величина силы тока» и т.д., так как эти характеристики (масса, площадь, сила тока) сами являются величинами. В этих случаях следует применять термины «размер величины» или «значение величины».

Классификация физических величин с учетом различных признаков

Для более детального изучения физических величин необходимо классифицировать и выявить общие метрологические особенности их отдельных групп.

По видам явлений физические величины делятся на следующие группы [4]:

- вещественные, то есть описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. К этой группе относятся масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др. Иногда указанные физические величины называют *пассивными*. Для их измерения необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. При этом пассивные физические величины преобразуются в активные, которые и измеряются;
- энергетические, то есть величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия. Эти величины называют *активными*. Они могут быть преобразованы в сигналы

измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

- характеризующие протекание процессов во времени. К этой группе относятся различного рода спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

По принадлежности к различным группам физических процессов физические величины делятся на пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По степени условной независимости от других величин данной группы физические величины делятся на основные (условно независимые), производные (условно зависимые) и дополнительные. В настоящее время в системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количество вещества. К дополнительным физическим величинам относятся плоский и телесный углы.

По наличию размерности физические величины делятся на размерные, то есть имеющие размерность, и безразмерные.

Уравнение $Q = q[Q]$ называют *основным уравнением измерений*. Суть простейшего измерения состоит в сравнении физической величины Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$. В результате сравнения устанавливают, что $q[Q] < Q < (q+1)[Q]$.

Что такое размер физической величины?
Есть ли различие в понятиях «значение величины» и «размер физической величины»?

Размер физической величины – количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Значение величины не следует смешивать с размером. Размер физической величины данного объекта существует реально и не зависит от того, знаем мы его или нет, выражаем его в каких-либо единицах или нет. Значение же физической величины появляется только после того, как размер величины данного объекта выражен с помощью какой-либо единицы.

Что значит индивидуальность в количественном отношении?

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что значение величины или размер величины может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Каким образом можно получить истинные значения физической величины?

Истинное значение физической величины может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений. Для каждого уровня развития измерительной техники мы можем знать только действительное значение физической величины, которое применяется вместо истинного значения физической величины. Понятие истинного значения физической величины необходимо как теоретическая основа развития теории измерений, в частности, при раскрытии понятия «погрешность измерений».

Что принимают за действительное значение физической величины?

За **действительное значение физической величины** обычно принимают среднее арифметическое из ряда значений величины, полученных при равноточных измерениях, или арифметическое среднее взвешенное при неравноточных измерениях.

Что такое физический параметр, влияющая физическая величина?

Физический параметр – физическая величина, рассматриваемая при измерении данной физической величины как вспомогательная характеристика этой величины.

При измерении электрического напряжения переменного тока частоту тока рассматривают как параметр напряжения. Иногда термин «физический параметр» применяют во множественном числе, например «параметры движения», «параметры электрических цепей». В этом случае под термином обычно понимают наиболее

существенные физические величины, которые характеризуют движение тел, или электрические цепи переменного тока.

Влияющая физическая величина – физическая величина, измерение которой не предусмотрено данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений физической величины, для которой предназначено средство измерений.



Что такое аддитивная и неаддитивная физические величины?

Аддитивная величина – физическая величина, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга. К аддитивным величинам относятся длина, масса, сила, давление, время, скорость и др.

Неаддитивная величина – физическая величина, для которой умножение на числовой коэффициент или деление друг на друга ее значений не имеют физического смысла. К неаддитивным величинам относят температуру по Международной практической температурной шкале, твердость материалов и др.



Что такое уравнение связи между физическими величинами (уравнение величины)?

Между физическими величинами существуют определенные связи и зависимости, которые могут быть выражены формулами, уравнениями.

Различают два вида уравнений: уравнения связи между величинами и уравнения связи между числовыми значениями.

Уравнение связи между величинами (уравнение величин) – уравнение, отражающее законы природы, в котором под буквенными символами понимаются физические величины.

Уравнение $s = vt$ отражает зависимость длины пути s , пройденного телом при равномерном движении, от скорости v тела и времени t его движения; уравнение $a = F/m$ отражает зависимость ускорения a , сообщаемого телу определенной массы, от действующей на тело силы F . Форма уравнения величин не зависит от выбора единиц, в которых могут быть выражены входящие в уравнение физические величины. В уравнениях связи между величинами под буквенными обозначениями величин подразумеваются значения величин, то есть произведение числового значения на единицу величины.

Коэффициент пропорциональности в уравнениях связи между величинами, за очень редкими исключениями, равен безразмерной единице (число 1).

Примером уравнения между величинами, в котором коэффициент пропорциональности отличен от единицы, является формула кинетической энергии T материальной точки или тела, движущегося поступательно:

$$T = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1.1)$$

Уравнения связи между величинами широко используются, особенно при определении производных единиц и размерностей физических величин, то есть являются определяющими уравнениями.

Что такое уравнение связи между числовыми значениями (уравнение числовых значений)?

Уравнение связи между числовыми значениями (уравнение числовых значений) – уравнение, в котором под буквенными символами понимаются числовые значения величин, соответствующие выбранным единицам.

В отличие от уравнений связи между величинами форма уравнений связи между числовыми значениями зависит от выбора единиц, в которых выражены величины, входящие в уравнение [3].

Если в формуле скорости равномерного движения $v = l/t$ скорость v выразить в километрах в час, длину пути l – в метрах, а время t – в секундах, то есть

$$v = v_{\text{км/ч}} \text{ км/ч}, \quad l = l_{\text{м}} \text{ м}, \quad t = t_{\text{с}} \text{ с},$$

то получим уравнение

$$v_{\text{км/ч}} \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{l_{\text{м}} \text{ м}}{t_{\text{с}} \text{ с}} \text{ или } v_{\text{км/ч}} = \frac{\text{ч}}{\text{с}} \frac{\text{м}}{\text{км}} \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}.$$

Из этого уравнения, учитывая, что 1 ч = 3600 с и 1 км = 1000 м, получим следующее уравнение связи между числовыми значениями:

$$v_{\text{км/ч}} = 3,6 \frac{l_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}. \quad (1.2)$$

Таким образом, выразив скорость в километрах в час, длину пути – в метрах, время – в секундах, мы получим уравнение связи с числовым коэффициентом 3,6.

Если же выразить скорость в милях в час (1 миля = 852 м), длину пути – в ярдах (ярд – единица длины в системе английских мер; 1 ярд = 0,9144 м), время – в секундах, то уравнение между числовыми значениями примет вид

$$v_{\text{миль/ч}} = 2,045 \frac{l_{\text{ярд}}}{t_c}. \quad (1.3)$$

Рассмотренные примеры показывают, что вид уравнения связи между числовыми значениями зависит от выбранных единиц.



Чем определяется выбор основных физических величин при построении системы физических величин?

Выбор физических величин, принимаемых за основные, и их число в принципе произвольны, но практические соображения приводят к некоторому ограничению свободы в выборе основных величин. В качестве основных величин прежде всего были выбраны величины, характеризующие коренные свойства материального мира: длина, масса, время. Остальные четыре основные величины выбраны так, чтобы каждая из них представляла один из разделов физики. Такими величинами стали сила тока, термодинамическая температура, количество вещества, сила света.

Каждой основной физической величине системы величин присваивается символ в виде строчной буквы латинского или греческого алфавитов. Символы эти следующие: длина – L , масса – M , время – T , сила электрического тока – I , температура – Θ , количество вещества – N , сила света – J .

Символы эти входят в название системы физических величин. Так, система величин механики, основными величинами которой являются длина, масса и время, называется «система LMT»; система величин, на которой строится Международная система единиц (СИ) и которая имеет семь основных величин, называется «система величин LMTI Θ NJ».



Каким образом формируются производные физические величины?

При построении системы физических величин подбирается такая последовательность определяющих уравнений, в которой каждое последующее уравнение содержит только одну новую производную величину, что позволяет выразить эту величину через совокупность ранее определенных величин, а, в конечном счете, через основные величины системы величин.



Каким образом можно найти размерность производной физической величины?

Чтобы найти размерность производной физической величины в некоторой системе величин, надо в правую часть определяющего уравнения этой величины вместо обозначений величин подставить их размерности. Так, например, поставив в определяющее уравнение скорости равномерного движения $v = ds/dt$ вместо ds размерность длины L и вместо dt размерность времени T , получим

$$\dim v = L/T = LT^{-1}. \quad (1.4)$$

Подставив в определяющее уравнение ускорения $a = dv/dt$ вместо dt размерность времени T и вместо dv найденную выше размерность скорости LT^{-1} , получим

$$\dim a = LT^{-2}. \quad (1.5)$$

Зная размерность ускорения по определяющему уравнению силы $F = ma$, получим:

$$\dim F = M \cdot LT^{-2} = LMT^{-2}. \quad (1.6)$$

Зная размерность силы, можно найти размерность работы, затем размерность мощности и т.д.

Размерность любой производной механической величины в системе величин LMT может быть выражена степенным рядом:

$$\dim x = L^\alpha M^\beta T^\gamma. \quad (1.7)$$



Общий вид размерности физической величины. Какие действия можно производить над размерностями?

Общий вид размерности физической величины в системе величин, построенной на семи основных величинах (длина, масса, время, сила тока, температура, сила света, количество вещества), может быть выражен формулой

$$\dim x = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon J^p N^q, \quad (1.8)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – показатели размерности физической величины.

Над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня. Действия сложения и вычитания размерностей не имеют смысла.



Показатель размерности физической величины: определение и характеристики

Показатель размерности физической величины – показатель степени, в которую возведена размерность основной физической величины, входящей в размерность производной физической величины.

Показатели размерности физической величины могут принимать различные значения: целые или дробные, положительные или отрицательные. Некоторые показатели размерности данной производной величины могут оказаться равными нулю.



Примеры размерных и безразмерных физических величин

Размерность физических величин: энергия, работа, количество теплоты определяется по формуле

$$\dim W = L^2 MT^{-2}. \quad (1.9)$$

То есть размерность физической величины является более общей характеристикой, чем представляющее ее уравнение связи, поскольку одна и та же размерность присуща величинам, имеющим разную качественную природу и различающимся по форме определяющего уравнения. Например, работа силы F на расстоянии L определяется уравнением

$$A_1 = F \cdot L.$$

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна

$$A_2 = m \cdot v^2 / 2.$$

Размерности этих качественно разных величин одинаковы.

Безразмерными величинами являются, например, относительная деформация, коэффициент полезного действия и вообще любая величина, равная отношению двух однородных величин. Безразмерными величинами могут быть также и иные комбинации величин (добротность колебательной системы, критерии подобия и др.).

Практическое применение понятия «размерность физической величины»

Пользуясь размерностью величины, можно установить, во сколько раз изменится размер единицы данной производной физической величины при изменении размеров единиц величин, принятых за основные [3].

Рассмотрим некоторую производную механическую величину x , имеющую размерность

$$\dim x = L^\alpha M^\beta T^\gamma. \quad (1.10)$$

Очевидно, что число раз n , в которое возрастет или уменьшится размер новой единицы $[x]'$ по сравнению с прежней единицей $[x]$, выразится соотношением

$$n = \frac{[x]'}{[x]} = \left(\frac{[l]'}{[l]} \right)^\alpha \left(\frac{[m]'}{[m]} \right)^\beta \left(\frac{[t]'}{[t]} \right)^\gamma, \quad (1.11)$$

где $[l]$, $[m]$, $[t]$ – прежние единицы длины, массы и времени соответственно, $[l]', [m]', [t]'$ – новые единицы тех же величин.

Определим, во сколько раз возрастет разница энергии, если единицу длины $[l] = 1$ см заменить единицей $[l]' = 1$ м, единицу массы $[m] = 1$ г заменить единицей $[m]' = 1$ кг, а единицу времени оставить без изменений, то есть $[t]' = [t] = 1$ с (такая замена основных единиц соответствует переходу от единиц системы СГС к единицам Международной системы единиц).

Так как размерность энергии в системе СГС и СИ одинакова и выражается соотношением

$$\dim E = L^2 M T^{-2}, \quad (1.12)$$

то для энергии E получим

$$n = \frac{[E]'}{[E]} = \left(\frac{[l]'}{[l]} \right)^2 \left(\frac{[m]'}{[m]} \right) \left(\frac{[t]'}{[t]} \right)^{-2}. \quad (1.13)$$

При переходе от единиц СГС к единицам СИ единица длины возрастает в 10^2 раз (1 м = 100 см), единица массы возрастает в 10^3 раз (1 кг = 1000 г), а единица времени остается прежней. Получим

$$n = \frac{[E]'}{[E]} = \left(\frac{10^2 \text{ см}}{1 \text{ см}} \right)^2 \left(\frac{10^3 \text{ г}}{1 \text{ г}} \right) \left(\frac{1 \text{ с}}{1 \text{ с}} \right)^{-2} = 10^4 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10^7. \quad (1.14)$$

Следовательно, при переходе от системы СГС к СИ единица энергии возрастает в 10^7 раз.

С помощью размерностей физических величин проверяют правильность уравнений, полученных в ходе теоретических выводов. При этом опираются на следующее требование, предъявляемое к

любому физическому равенству: размерности правой и левой части равенства, связывающего различные физические величины, должны быть одинаковыми.

Если при проверке выяснится, что эти размерности не одинаковы, то это значит, что в процессе вывода была допущена ошибка или в уравнение входит неучтенный размерный коэффициент.

На основе размерностей физических величин разработан метод установления функциональных связей между физическими величинами (анализ размерностей).

Если известны физические величины (включая размерные параметры), характеризующие некоторый процесс, то методом сравнения размерностей можно с точностью до безразмерного множителя найти уравнение, показывающее связь этих величин между собой.

Пусть некоторая величина y является функцией величин x_1, x_2, \dots, x_n :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1.15)$$

Согласно изложенному выше требованию равенства размерностей левой и правой частей физических уравнений, можно записать

$$\dim y = \dim f. \quad (1.16)$$

Решая это уравнение, можно получить необходимые данные для определения вида функции y .



Пример практического применения понятия «размерность физической величины»

Необходимо определить зависимость периода колебаний математического маятника от величин, характеризующих этот маятник. Маятник характеризуется двумя величинами: массой m и длиной l . Колебания маятника совершаются под действием силы тяжести P . Следовательно, период колебаний может зависеть только от этих трех величин, то есть является функцией вида

$$\tau = f(l, m, P). \quad (1.17)$$

Предположим, что в этой функции величины l, m, P входят с показателями степени α, β, γ соответственно, то есть сама функция имеет вид

$$\tau = Cl^\alpha m^\beta P^\gamma, \quad (1.18)$$

где C – некоторая постоянная.

Запишем условие равенства размерностей левой и правой частей равенства:

$$\dim \tau = \dim(l^\alpha m^\beta P^\gamma). \quad (1.19)$$

Так как $\dim l=L$, $\dim m=M$, $\dim P=LMT^{-2}$, $\dim \tau=T$, то

$$T = L^\alpha M^\beta (LMT^{-2})^\gamma \text{ или } T = L^{\alpha-\gamma} M^{\beta-\gamma} T^{-2\gamma}. \quad (1.20)$$

Сравнивая соответствующие показатели размерностей левой и правой частей этого равенства, получаем систему уравнений:

$$\alpha + \gamma = 0, \beta + \gamma = 0, -2\gamma = 1. \quad (1.21)$$

Решив эту систему уравнений, найдем:

$$\alpha = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{2}, \gamma = -\frac{1}{2}. \quad (1.22)$$

Подставив найденные значения показателей размерности, получим

$$\tau = Cl^{1/2} m^{1/2} P^{-1/2} = C \sqrt{\frac{lm}{P}}. \quad (1.23)$$

Так как сила тяжести $P=mg$, то

$$\tau = C \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.24)$$

Постоянная C зависит от начального угла отклонения маятника от положения равновесия и не может быть определена этим методом. Как указано выше, зависимость между физическими величинами с помощью анализа размерностей определяется только с точностью до безразмерной постоянной. В этом смысле метод анализа размерностей не является универсальным.

Как известно из курса физики, при малых углах отклонения математического маятника постоянная $C = 2\pi$, а формула в этом случае имеет вид

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.25)$$

ГЛАВА 2

Единицы ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Термины и определения

Единица измерения физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

➤ На практике широко применяется понятие *установленные единицы*, которое раскрывается как «система единиц и (или) отдельные единицы, установленные для применения в стране в соответствии с законодательными актами».

Система единиц физических величин – совокупность основных и производных единиц, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин.

Основная единица физической величины – единица основной физической величины в данной системе единиц.

➤ Основные единицы Международной системы единиц (СИ): метр (м), килограмм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвин (К), моль (моль) и кандела (кд).

Дополнительная единица системы физических величин

➤ Термин «дополнительная единица» был введен в 1960 г. Дополнительными единицами являлись «радиан» и «стерирадиан». В 1995 г. XIX Генеральной конвенцией по мерам и весам (ГКМВ) класс дополнительных единиц исключен.

Производная единица системы единиц физических величин – единица производной физической величины системы единиц, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами или с основными и уже определенными производными.

➤ 1 м/с – единица скорости, образованная из основных единиц СИ – метра и секунды. 1 Н – единица силы, образованная из основных единиц СИ – килограмма, метра и секунды.

Системная единица физической величины – единица физической величины, входящая в принятую систему единиц.

➤ Основные, производные, кратные и дольные единицы СИ являются системными. Например: 1 м; 1 м/с; 1 км; 1 нм.

Внесистемная единица физической величины – единица физической величины, не входящая в принятую систему единиц.

➤ Внесистемные единицы (по отношению к единицам СИ) разделяются на четыре группы:

- 1 – допускаемые наравне с единицами СИ;
- 2 – допускаемые к применению в специальных областях;
- 3 – временно допускаемые;
- 4 – устаревшие (недопускаемые).

Когерентная производная единица физической величины – производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы единиц уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1.

Когерентная система единиц физических величин – система единиц физических величин, состоящая из основных единиц и когерентных производных единиц.

➤ Кратные и дольные единицы от системных единиц не входят в когерентную систему.

Кратная единица физической величины – единица физической величины, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы.

➤ Единица длины 1 км = 10^3 м, то есть кратная метру; единица частоты 1 МГц (мегагерц) = 10^6 Гц, кратная герцу; единица активности радионуклидов 1 МБк (мегабеккерель) = 10^6 Бк, кратная беккерелю.

Дольная единица физической величины – единица физической величины, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы.

Глава 2. Единицы физических величин

➤ Единица длины 1 нм (нанометр) = 10^{-9} м и единица времени 1 мкс = 10^{-6} с являются дольными соответственно от метра и секунды.

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

➤ Международная температурная шкала, состоящая из ряда реперных точек, значения которых приняты по соглашению между странами Метрической Конвенции и установлены на основании точных измерений, предназначена служить исходной основой для измерений температуры.

Условная шкала физической величины – шкала физической величины, исходные значения которой выражены в условных единицах.

➤ Нередко условные шкалы называют неметрическими шкалами.

Шкала твердости минералов Мооса, шкалы твердости металлов (Бринелля, Виккерса, Роквелла и др.).

2.2. Основные вопросы для изучения темы

Системы единиц, которые применялись до введения международной системы

Метрическая система мер – совокупность единиц физических величин, в основу которой положены две единицы: метр – единица длины, килограмм – единица массы. Отличительной особенностью Метрической системы мер явился принцип десятичных соотношений в отношении кратных и дольных единиц. Метрическая система мер, введенная первоначально во Франции, получила во второй половине XIX в. международное признание [3].

Система Гаусса. Впервые понятие системы единиц физических величин было введено немецким математиком К. Гауссом (1832). Идея Гаусса состояла в следующем. Сначала выбирается несколько величин, не зависящих друг от друга. Величины эти называют основными, а их единицы – основными единицами системы единиц. Основные величины выбираются так, чтобы, пользуясь формулами, выражающими связь между физическими величинами, можно было образовать единицы других величин. Единицы, полученные с помощью формул и выраженные через основные единицы, Гаусс назвал производными единицами.

Пользуясь своей идеей, Гаусс построил систему единиц магнитных величин. Основными единицами этой системы были выбраны: миллиметр – единица длины, секунда – единица времени.

Идеи Гаусса оказались весьма плодотворными. Все последующие системы единиц строились на предложенных им принципах.

Система СГС построена на основе системы величин LMT. Основные единицы системы СГС: сантиметр – единица длины, грамм – единица массы, секунда – единица времени.

В системе СГС с использованием указанных трех основных единиц установлены производные единицы механических и акустических величин. С использованием единицы термодинамической температуры – кельвина – и единицы силы света – кандлы – система СГС распространяется на область тепловых и оптических величин.

Система МКС. Основные единицы системы МКС: метр – единица длины, килограмм – единица массы, секунда – единица времени. Так же как и система СГС, система МКС построена на основе системы величин LMT. Эта система единиц была предложена в 1901 г. итальянским инженером Джорджи и содержала кроме основных производные единицы механических и акустических величин. Путем добавления в качестве основных единицы

Глава 2. Единицы физических величин

термодинамической температуры – кельвина – и силы света – кандэлы – систему МКС можно было распространить на область тепловых и световых величин.

Система МТС. Система единиц МТС построена на основе системы величин LMT. Основные единицы системы: метр – единица длины, тонна – единица массы, секунда – единица времени. Система МТС была разработана во Франции и узаконена ее правительством в 1919 г.

Система МТС была принята и в СССР и в соответствии с государственным стандартом применялась более 20 лет (1933 – 1955).

Единица массы этой системы – тонна – по своему размеру оказалась удобной в ряде отраслей производства, имеющих дело со сравнительно большими массами. Система МТС имела и ряд других преимуществ. Во-первых, числовые значения плотности вещества при выражении ее в системе МТС совпадали с числовыми значениями этой величины при выражении ее в системе СГС (например в системе СГС плотность железа $7,8 \text{ г/см}^3$, в системе МТС – $7,8 \text{ т/м}^3$). Во-вторых, единица работы системы МТС – килоджоуль – имела простое соотношение с единицей работы системы МКС ($1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж}$). Но размеры единиц подавляющего большинства производных величин в этой системе оказались неудобными на практике. В СССР система МТС была отменена в 1955 г.

Система МКГСС. Система единиц МКГСС построена на основе системы величин LFT. Основные единицы ее: метр – единица длины, килограмм-сила – единица силы, секунда – единица времени.

Килограмм-сила – сила, равная весу тела массой 1 кг при нормальном ускорении свободного падения $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$. Эта единица силы, а также некоторые производные единицы системы МКГСС оказались удобными при применении их в технике. Поэтому система получила широкое распространение в механике, теплотехнике и ряде других отраслей производства.

Основной недостаток системы МКГСС – весьма ограниченные ее возможности применения в физике. Существенным недостатком системы МКГСС является также то, что единица массы в этой системе не имеет простого десятичного соотношения с единицами массы других систем.

С введением Международной системы единиц система МКГСС утратила свое значение.

Системы единиц электромагнитных величин. Известны два способа построения систем электрических и магнитных величин на основе системы СГС: на трех основных единицах (сантиметр, грамм, секунда) и на четырех основных единицах (сантиметр, грамм, секунда и одна единица электрической или магнитной величины).

Первым способом, то есть с использованием трех основных единиц на основе системы СГС, получены три системы единиц: электростатическая система единиц (система СГСЭ), электромагнитная система единиц (система СГСМ), симметричная система единиц (система СГС). Рассмотрим эти системы.

Электростатическая система единиц (система СГСЭ). При построении этой системы первой производной электрической единицей вводится единица электрического заряда с использованием закона Кулона в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная диэлектрическая проницаемость рассматривается безразмерной электрической величиной. Как следствие этого, в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

Электромагнитная система единиц (система СГСМ). При построении этой системы первой производной электрической единицей вводится единица силы тока с использованием закона Ампера в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная магнитная проницаемость рассматривается безразмерной электрической величиной. В связи с этим, в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

Симметричная система единиц (система СГС). Эта система является совокупностью систем СГСЭ и СГСМ. В системе СГС в качестве единиц электрических величин используются единицы системы СГСЭ, а в качестве единиц магнитных величин – единицы системы СГСМ. В результате комбинации двух систем в некоторых уравнениях, связывающих электрические и магнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

Характеристика естественных систем единиц

Естественными системами единиц называют системы, в которых за основные единицы приняты фундаментальные физические постоянные, такие, например, как элементарный электрический заряд (заряд протона) e , масса протона m_e , постоянная Планка h и \hbar , скорость света в вакууме c , гравитационная постоянная G , постоянная Больцмана k .

Таким образом, в отличие от всех других систем единиц, в которых выбор основных единиц обусловлен требованиями практики измерений, в естественных системах размер основных единиц определяется явлениями природы.

Впервые естественную систему единиц предложил М. Планк (1906), выбрав в качестве основных единиц постоянную Планка \hbar , скорость света c , гравитационную постоянную G , постоянную Больцмана k .

При построении естественных систем единиц фундаментальные постоянные, выбранные в качестве основных единиц, формально полагаются равными безразмерной единице. С учетом этого естественную систему единиц Планка можно охарактеризовать соотношением $\hbar = c = G = k = 1$.

Кроме системы Планка известны:

- **система Хартри**, называемая также системой атомных единиц, характеризуемая соотношением $e = m_e = \hbar = 1$;
- **релятивистская система единиц**, используемая в квантовой электродинамике и характеризуемая соотношением $c = m_e = \hbar = 1$.

Удобство введенных естественных систем единиц состоит в том, что параметры атомных объектов в этих системах по размеру не сильно отличаются от единицы, и в то же время упрощаются основные уравнения теории.

Производные величины в естественных системах единиц являются комбинациями из основных величин. При этом оказывается, что с заданной размерностью из основных величин можно получить только одну комбинацию, которая и образует производную величину с заданной размерностью.

Например, время в системе Хартри является следующей комбинацией основных величин этой системы:

$$t = \frac{\hbar^3}{m_e e^4}. \quad (2.1)$$

Убедимся в том, что правая часть этой формулы действительно имеет размерность времени. Для этого подставим в эту формулу вместо e , m_e и \hbar их размерности в системе СГС (при этом учтем, что постоянная Планка есть элементарный квант действия, то есть выражает величину, равную произведению энергии ε на время t):

$$\dim t = \frac{\dim \hbar^3}{\dim m_e \dim e^4} = \frac{\dim \varepsilon^3 \dim t^3}{\dim m_e \dim e^4} = \frac{(L^2 M T^{-2})^3 T^3}{M (L^{3/2} M^{1/2} T^{-1})^4} = \frac{L^6 M^3 T^{-3}}{L^6 M^3 T^{-4}} = T, \quad (2.2)$$

то есть, действительно, комбинация основных величин системы Хартри, приведенных в формуле, имеет размерность времени.

Если теперь подставить в (2.1) значения e , m_e и \hbar , выраженные в системе СГС, то найдем значение единицы времени в системе Хартри:

$$[t] = 2,42 \cdot 10^{-17} \text{ с.} \quad (2.3)$$

Аналогично можно получить и другие единицы системы атомных единиц.

Естественные системы единиц находят применение в некоторых разделах теоретической физики.

Основные достоинства и преимущества Международной системы единиц (СИ)

В настоящее время широко применяются две системы единиц: СИ и СГС (симметричная, или гауссова). Система СГС существует более 100 лет и до сих пор используется в точных науках – физике, астрономии. Однако ее все более теснит СИ – единственная система единиц физических величин, которая принята и используется в большинстве стран мира. Это обусловлено ее достоинствами и преимуществами перед другими системами единиц, к которым относятся [4]:

- универсальность, то есть охват всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- когерентность величин;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением;
- упрощение записи формул в физике, химии, а также в технических науках в связи с отсутствием переводных коэффициентов;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах, так как отпадает необходимость в изучении множества систем единиц и внесистемных единиц;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.



Единая Международная система единиц (СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1960 г. На территории нашей страны система единиц (СИ) действует с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.407–81 (в настоящее время он заменен на ГОСТ 8.417–2002). СИ является логическим развитием предшествовавших ей систем единиц СГС, МКГСС и др.



Почему в качестве основных единиц выбраны ампер, кандела, моль?

В СИ за основную единицу выбрана единица абсолютной магнитной проницаемости $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, называемая *магнитной постоянной* [4]. Однако формально основной единицей считается ампер. Это связано с тем, что при выборе основной единицы путем постулирования ее истинного значения оказывается невозможным материализовать данную единицу в виде эталона. Поэтому реализация такой единицы осуществляется через какую-либо производную единицу. Так, единица скорости материализуется эталоном метра, а единица магнитной проницаемости – эталоном ампера. В разделе электромагнетизма СИ нет мировых констант, поскольку система оптимальна и не содержит «лишней» единицы.

Ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Поскольку скорость света в вакууме в СИ принята равной 299792458 м/с, то электрическая проницаемость вакуума ϵ_0 , называемая *электрической постоянной*, также будет точной постоянной.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = 8,854187187 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}. \quad (2.4)$$

Световые измерения, то есть измерения параметров электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,38 до 0,76 мкм, имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. Поэтому световые измерения не вполне объективны. Наблюдателя интересует только та часть потока электромагнитных колебаний, которая напрямую воздействует на глаз. В связи с этим обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная взаимосвязь, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения СИ число основных единиц физических величин, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений – человека, было принято решение ввести единицу силы света – канделу.

Кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт·ср⁻¹.

Проведенные исследования показали, что глаз человека в среднем имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают *абсолютной световой эффективностью*, которая равна отношению светового потока (то есть оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения (к полной мощности электромагнитного излучения). Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую переходить от энергетических величин к световым. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. Максимальной световой эффективности придано точное значение

$$K_m = 683 \text{ лм/Вт},$$

тем самым она введена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим кандела определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной. Остальные световые величины – производные и выражаются через введенные ранее физические величины.

Последняя основная единица СИ – моль была дополнительно введена в систему, спустя 11 лет после введения первых шести единиц на XIV Генеральной конференции по мерам и весам в 1971 г.

Моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде-12 массой 0,0012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

При введении моля был допущен ряд отступлений от принципов образования систем физических величин. Во-первых, не было дано четкого и однозначного определения основополагающего понятия «количество вещества». Под количеством вещества можно понимать как массу того или иного вещества, так и количество структурных единиц, содержащихся в данном веществе. Во-вторых, из определения основной единицы неясно, каким образом возможно получение объективно количественной информации о физической величине при помощи измерений.

В этой связи возникает вопрос о функции, выполняемой молем среди основных единиц СИ. Любая основная единица призвана осуществлять две функции. Воспроизведенная в виде эталона, она обеспечивает единство измерений не только собственной физической величины, но и производных величин, в формировании размерности

которых она участвует. С формальных позиций при образовании удельных величин моль входит в их размерность. Тем не менее удельную величину не следует отождествлять с производной физической величиной, то есть моль не выполняет функций единицы основной физической величины. Моль является расчетной единицей, и эталона для его воспроизведения не существует. Нет также ни одного метода и средства, предназначенного для измерения моля в соответствии с его определением.

?(?) Разница между понятиями «масса» и «вес тела»

Уравнение $G = mg$ позволяет пояснить разницу между понятиями «масса» и «вес тела», что накладывает соответствующие условия на измерение этих величин. Если масса тела измеряется с помощью весов, то вес – с помощью динамометра.

Ускорение свободного падения в первом приближении зависит от географической широты места и его высоты над уровнем моря. «Нормальное» значение ускорения свободного падения над широтой 45° (на уровне моря) составляет $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$, на экваторе $g = 9,780 \text{ м/с}^2$, а на полюсе $g = 9,8324 \text{ м/с}^2$. Таким образом, на экваторе тело массой m весит меньше, а на полюсе оно тяжелее, например, человек массой в 80 кг на экваторе имеет вес, равный 782,4 Н, а переместившись на один из полюсов Земли, – около 786,5 Н.

Заметим попутно, что в геофизике ускорение свободного падения обычно выражают внесистемной единицей – миллигалиом (мГал), в честь Г. Галилея. При этом $1 \text{ Гал} = 1 \text{ см/с}^2 = 10^3 \text{ мГал}$.

?(?) Внесистемные единицы измерения давления

В настоящее время применяются (временно) такие внесистемные единицы, как **миллиметр ртутного столба** (мм рт. ст.), **бар** (bar). Паскаль имеет следующее соотношение с этими единицами: 1 мм рт. ст. = 133,322 Па; 1 бар равен силе 10^6 дин, действующей на площадь в 1 см^2 , что эквивалентно давлению ртутного столба высотой в 750,08 мм на уровне моря для широты 45° (при этом 1 бар = 10^5 Па). В метрологии применяется дольная единица – миллибар (1 мбар = 100 Па).

Атмосфера нормальная или физическая (атм, Atm), равная давлению ртутного столба высотой 750 мм при температуре 0°C и при нормальном ускорении свободного падения $9,80665 \text{ м/с}^2$. В 1954 г. эта единица была рекомендована X ГКМВ к применению в физике и метеорологии (1 атм = $1,01325 \cdot 10^5$ Па).

Атмосфера техническая (ат, at), или килограмм-сила на квадратный сантиметр ($\text{кгс}/\text{см}^2$), равна давлению, вызываемому силой в 1 кгс, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 см^2 (1 ат = $9,80665 \cdot 10^4$ Па). При приближенных измерениях одну атмосферу (1 атм) можно заменить одним баром (1 бар = 0,98692 атм).

В зарубежной литературе иногда при измерениях малых давлений используется единица, размер которой совпадает с 1 мм рт. ст., а именуется она «торр» (torr) по имени итальянского ученого Э. Торричели.

Шкалы измерений: типы, принципы построения

На практике необходимо проводить измерения различных физических величин, характеризующих свойства веществ, тел, явлений и процессов. Некоторые свойства проявляются только количественно, другие – качественно. Количественные или качественные проявления любого свойства отражаются множествами, которые образуют шкалы измерения этих свойств. **Шкала измерений** количественного свойства является шкалой физической величины. **Шкала физической величины** – это упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая на основании результатов точных измерений [4].

В соответствии с логической структурой проявления свойств шкалы измерений делятся на пять основных типов: наименований, порядка, интервалов, отношений и абсолютные шкалы.

Шкала наименований (шкала классификации) основана на приписывании объекту цифр (знаков), играющих роль простых имен: это приписывание служит для нумерации предметов только с целью их идентификации или для нумерации классов, причем, такой нумерации, что каждому из элементов соответствующего класса приписывается одна и та же цифра. Такое приписывание цифр выполняет на практике ту же функцию, что и наименование. Поэтому с цифрами, используемыми только как специфические имена, нельзя производить никаких арифметических действий. Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствует понятие нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения. Примером шкал наименований являются атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

Шкала порядка (шкала рангов) предполагает упорядочение объектов относительно какого-то определенного свойства, то есть расположение их в порядке убывания или возрастания данного

свойства. Полученный при этом упорядоченный ряд называют ранжированным рядом, а саму процедуру *ранжированием*.

По шкале порядка сравниваются между собой однородные объекты, у которых значения интересующих свойств неизвестны. Поэтому ранжированный ряд может дать ответ на вопросы типа – «что больше (меньше)» или, «что лучше (хуже)». Более подробную информацию – на сколько больше или меньше, во сколько раз лучше или хуже, шкала порядка дать не может. Очевидно, что назвать процедуру оценивания свойств объекта по шкале порядка измерением можно только с большой натяжкой.

Результаты оценивания по шкале порядка также не могут подвергаться никаким арифметическим действиям. Однако небольшое, казалось бы, усовершенствование шкалы порядка позволило применить ее для числового оценивания величин в тех случаях, когда отсутствует единица величины. Для этого, расположив объекты в порядке возрастания (убывания) того или иного свойства, некоторые точки ранжированного ряда фиксируют в качестве отправных (реперных). Совокупность реперных точек образует некую «лестницу» – шкалу возможных проявлений соответствующего свойства. Реперным точкам могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые *баллами* и, таким образом, появляется возможность оценивания, «измерения» данного свойства в баллах, по натуральной шкале.

Основным недостатком натуральных шкал является полное отсутствие уверенности в том, что интервалы между выбранными реперными точками являются равновеликими. Введенные числовые обозначения не могут быть использованы для выполнения математических операций.

Определение значения величин при помощи шкал порядка относится к операции оценивания, а не измерения, ввиду отсутствия единицы измерения. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным.

Шкала интервалов (шкала разностей). Эти шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка. Для их построения вначале устанавливают единицу физической величины. На шкале интервалов откладывается разность значений физической величины, сами же значения остаются неизвестными.

Данная шкала состоит из одинаковых интервалов и произвольно выбрано начало – нулевая точка.

Примерами шкал интервалов являются шкалы температур: Цельсия, Фаренгейта, Реомюра. На температурной шкале Цельсия за начало отсчета разности температур принята температура таяния льда. С ней сравниваются все другие температуры. Для удобства пользования шкалой интервал между температурой таяния льда и

температурой кипения воды разделен на 100 равных интервалов – градусов. Шкала Цельсия распространяется как в сторону положительных, так и отрицательных интервалов. Когда говорят, что температура воздуха равна 25°C , это означает, что она на 25 градусов выше температуры, принятой за нулевую отметку шкалы (выше нуля).

На температурной шкале Фаренгейта тот же интервал разбит на 180 градусов. Следовательно, градус Фаренгейта по размеру меньше, чем градус Цельсия. Кроме того, начало отсчета интервалов на шкале сдвинуто на 32 градуса в сторону низких температур.

Деление шкалы интервалов на равные части – градации – устанавливает единицу физической величины, что позволяет не только выразить результат измерения в числовой мере, но и оценить погрешность измерения.

Результаты измерений по шкале интервалов можно складывать друг с другом и вычитать друг из друга, то есть определять, на сколько одно значение физической величины больше или меньше другого. Определить по шкале интервалов, во сколько раз одно значение величины больше или меньше другого, невозможно, поскольку на шкале не определено начало отсчета физической величины. Но в то же время это может быть сделано в отношении интервалов (разностей). Так, разность температур 25 градусов в 5 раз больше разности температур 5 градусов.

Шкала отношений описывает свойства эмпирических объектов. Она представляет собой интервальную шкалу с естественным началом. Если, например, за начало температурной шкалы принять абсолютный нуль (более низкой температуры в природе быть не может), то по такой шкале уже можно отсчитывать абсолютное значение температуры и определять не только, на сколько температура T_1 одного тела больше температуры T_2 другого, но и во сколько раз больше или меньше по правилу:

$$\frac{T_1}{T_2} = n. \quad (2.5)$$

Таким образом, шкала термодинамической температуры является примером шкалы отношений. К ним относится и шкала масс.

В общем случае, при сравнении между собой двух физических величин X по такому правилу значения n , расположенные в порядке возрастания или убывания, образуют шкалу отношений. Она охватывает интервал значений n от 0 до ∞ и, в отличие от шкалы интервалов, не содержит отрицательных значений.

Шкала отношений является самой совершенной, наиболее информативной. Результаты измерений по шкале отношений можно складывать между собой, вычитать, перемножать или делить.

Шкалы отношений описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q – физическая величина, для которой строится шкала, $[Q]$ – ее единица, q – числовое значение физической величины. Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением

$$q_2 = q_1 \frac{[Q_1]}{[Q_2]}. \quad (2.6)$$

Абсолютные шкалы. Под абсолютными шкалами понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественные однозначно определенные единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерений. Такие шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослабления и т.д.

Каким образом можно задать шкалу интервалов?

Шкалу интервалов величины Q можно представить в виде уравнения

$$Q = Q_0 + q[Q], \quad (2.7)$$

где q – числовое значение величины; Q_0 – начало отсчета шкалы; $[Q]$ – единица рассматриваемой величины. Такая шкала полностью определяется заданием начала отсчета Q_0 шкалы и единицы данной величины $[Q]$.

Задать шкалу можно двумя способами.

При **первом способе** выбираются два значения Q_0 и Q_1 величины, которые относительно просто реализованы физически. Эти значения называют *опорными точками*, или *основными реперами*, а интервал $(Q_1 - Q_0)$ – основным интервалом. Точка Q_0 принимается за начало отсчета, а величина $(Q_1 - Q_0)/n = [Q]$ за единицу Q . При этом число единиц n выбирается таким, чтобы $[Q]$ было целой величиной.

При **втором способе** единица воспроизводится непосредственно как интервал, его некоторая доля или некоторое число интервалов размеров данной величины, а начало отсчета выбирают каждый раз по-разному в зависимости от конкретных условий изучаемого явления. Пример такого подхода – шкала времени, в которой $1\text{с} = 9192631770$ периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. За начало отсчета принимается начало изучаемого явления.



Формула для перехода от температуры по шкале Фаренгейта к температуре по шкале Цельсия

Шкала Фаренгейта является шкалой интервалов. На ней Q_0 – температура смеси льда, поваренной соли и нашатыря, Q_1 – температура человеческого тела. Единица измерения – градус Фаренгейта:

$$[Q_F] = (Q_1 - Q_0) / 96 = 1^{\circ}\text{F}. \quad (2.8)$$

Температура таяния смеси льда, соли и нашатыря оказалась равной 32°F , а температура кипения воды – 212°F .

По шкале Цельсия Q_0 – температура таяния льда, Q_1 – температура кипения воды. Градус Цельсия:

$$[Q_C] = (Q_1 - Q_0) / 100 = 1^{\circ}\text{C}. \quad (2.9)$$

Перевод одной шкалы интервалов $Q = Q_{01} + q_1 [Q]_1$ в другую $Q = Q_{02} + q_2 [Q]_2$ осуществляется по формуле:

$$q_1 = \left(q_2 - \frac{Q_{02} - Q_{01}}{[Q]_1} \right) \frac{[Q]_1}{[Q]_2}. \quad (2.10)$$

Значение разности температур по шкале Фаренгейта между точкой кипения воды и точкой таяния льда составляет $212^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F} = 180^{\circ}\text{F}$. По шкале Цельсия интервал температур равен 100°C . Следовательно, $100^{\circ}\text{C} = 180^{\circ}\text{F}$ и отношение размеров единиц

$$\frac{[Q]_1}{[Q]_2} = \frac{{}^{\circ}\text{F}}{{}^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}. \quad (2.11)$$

Числовое значение интервала между началами отсчета по рассматриваемым шкалам, измеренного в градусах Фаренгейта ($[Q]_1 = \text{F}$), равно 32. Переход от температуры по шкале Фаренгейта к температуре по шкале Цельсия производится по формуле

$$t = \frac{5}{9}(t_F - 32). \quad (2.12)$$



В каких случаях используются условные шкалы? Известные условные шкалы

В случаях, когда уровень познания явления не позволяет точно установить отношения, существующие между величинами данной характеристики, либо применение шкалы удобно и достаточно для практики, используют условные (эмпирические) шкалы порядка. **Условная шкала** – это шкала физической величины, исходные значения которой выражены в условных единицах. Например, шкала

Глава 2. Единицы физических величин

вязкости Энглера, 12-балльная шкала Бофорта для измерения силы морского ветра [3].

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам, например, относится шкала Мооса для определения твердости минералов, которая содержит 10 опорных (реперных) минералов с различными условными числами твердости: тальк – 1, гипс – 2, кальций – 3, флюорит – 4, апатит – 5, ортоклаз – 6, кварц – 7, топаз – 8, корунд – 9, алмаз – 10. Отнесение минерала к той или иной градации твердости осуществляется на основании эксперимента, который состоит в том, что испытуемый материал царапается опорным. Если после царапанья испытуемого минерала кварцем (7), а после ортоклаза (6) – не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точного ответа в этом случае дать невозможно.

В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел, отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций.

Значимость изучения характеристик различных шкал и особенностей их использования, наряду с узаконенными единицами измерений, в системе обеспечения единства измерений за последнее время существенно возросла. Этот процесс, вероятно, будет развиваться в направлении включения в будущем понятия «шкала измерений» в определение единства измерений.

Шкала Бофорта оценки силы ветра

Условная шкала для оценки скорости (силы) ветра в баллах по его действию на наземные предметы или по волнению на море. Первоначально шкала (как 12-балльная) была предложена Ф. Бофортом в 1805 г. Соотношение между баллами Бофорта и скоростью ветра над сушей на высоте 10 м, принятые по международному соглашению 1946 г., представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Баллы Бофорта	Скорость, м/с	Характеристика ветра	Действие ветра
1	2	3	4
0	0 – 0,5	Штиль	Полное отсутствие ветра. Дым из труб поднимается отвесно
1	0,6 – 1,7	Тихий	Дым из труб поднимается не совсем отвесно
2	1,8 – 3,3	Легкий	Движение воздуха ощущается лицом. Шелестят листья
3	3,4 – 5,2	Слабый	Колеблются листья и мелкие сучья. Развеваются легкие флаги

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4
4	5,3 – 7,4	Умеренный	Колеблются тонкие ветви деревьев. Ветер поднимает пыль и клочья бумаги
5	7,5 – 9,8	Свежий	Колеблются большие сучья. На воде поднимаются волны
6	9,9 – 12,4	Сильный	Колышутся большие ветви. Гудят телеграфные провода
7	12,5 – 15,2	Крепкий	Качаются небольшие стволы деревьев. На море поднимаются пенящиеся волны
8	15,3 – 18,2	Очень крепкий	Ломаются ветви деревьев. Трудно идти против ветра
9	18,3 – 21,5	Шторм	Небольшие разрушения. Срываются дымовые трубы и черепица
10	21,6 – 25,1	Сильный шторм	Значительные разрушения. Деревья вырываются с корнем
11	25,2 – 29,0	Жестокий шторм	Большие разрушения
12 – 17	более 29,0	Ураган	Производит опустошительные действия

Эмпирическая сейсмическая шкала

Таблица 2.2

Балл	Название землетрясения	Краткая характеристика землетрясения	
		1	2
1	Незаметное	Отмечается только сейсмическими приборами	3
2	Очень слабое	Ощущается отдельными людьми, находящимися в состоянии полного покоя	
3	Слабое	Ощущается лишь небольшой частью населения	
4	Умеренное	Распознается по легкому дребежанию и колебанию предметов, посуды и оконных стекол, скрипу дверей и стен	
5	Довольно сильное	Общее сотрясение зданий, колебания мебели. Трещины в оконных стеклах и штукатурке	
6	Сильное	Ощущается всеми. Картины падают со стен. Откалываются куски штукатурки. Легкое повреждение зданий	
7	Очень сильное	Трещины в стенах каменных домов. Антисейсмические, а также деревянные постройки остаются невредимыми	
8	Разрушительное	Трещины на круtyх склонах и на сырой почве. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Дома сильно повреждаются	
9	Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов	

Окончание таблицы 2.2

1	2	3
10	Уничтожающее	Крупные трещины в почве. Оползни и обвалы. Разрушение каменных построек. Искривление железнодорожных рельсов
11	Катастрофа	Широкие трещины в земле. Многочисленные оползни и обвалы. Каменные дома совершенно разрушаются
12	Сильная катастрофа	Изменения в почве достигают огромных размеров. Многочисленные трещины, обвалы, оползни. Возникновение водопадов, подпруд на озерах, отклонение течения рек. Ни одно сооружение не выдерживает

Шкала землетрясений Ч. Рихтера

Шкала, предложенная в 1935 г. Ч. Рихтером, представляет собой относительную логарифмическую шкалу магнитуд, относящуюся по классификационным признакам к шкалам порядка. При этом под магнитудой понимается условная величина, характеризующая энергию упругих колебаний, вызываемых землетрясениями (взрывами). В этой шкале сила данного землетрясения сопоставляется с землетрясением стандартного масштаба при одинаковых условиях наблюдений.

Шкала строится по определению Ч. Рихтера:

$$M = \lg[A(\Delta)/A_0(\Delta)] = \lg A(\Delta) - \lg A_0(\Delta), \quad (2.13)$$

где M – магнитуда; Δ – расстояние от эпицентра; A – максимальная амплитуда, зарегистрированная (записанная) сейсмографом Вуда-Андерсена; A_0 – максимальная амплитуда, зарегистрированная сейсмографом для стандартного землетрясения.

К стандартному относится землетрясение, имеющее магнитуду $M = 0$, при котором максимальная амплитуда записи на сейсмографе Вуда-Андерсена равна 1 мкм при $\Delta = 100$ км.

Сейсмограф Вуда-Андерсена представляет собой вертикально установленный цилиндр, соединенный вдоль образующей с тонкой проволокой, смонтированной на раме, жестко связанной с почвой. В состоянии покоя равновесие цилиндра поддерживается вследствие жесткости проволоки на кручение. Резкое колебание почвы приводит к закручиванию проволоки. Регистрация величины закручивания производится с помощью зеркала, которое отбрасывает сфокусированный луч света на фотобумагу, движущуюся с постоянной скоростью.

Магнитуда M в зависимости от энергии E очага землетрясения определяется по формуле

$$\lg E(\text{эр}г) = 11,8 + 1,5M. \quad (2.14)$$

Как известно, $1 \cdot 10^7$ эрг = 1 Дж.

Наиболее сильные зарегистрированные землетрясения имеют $M = 8,5$, при которых энергия очага землетрясения составляет $3,6 \cdot 10^{17}$ Дж.

При определении балла землетрясения необходимо знать не только значение магнитуды, но и глубину очага землетрясения. Таким образом, шкала землетрясений Рихтера доступна для применения (практического) специалистам сейсмических лабораторий (станций), оснащенных специализированным оборудованием.

В настоящее время в мировой практике оценки разрушающей силы землетрясений наибольшее распространение получила шкала Рихтера.

Теперь остановимся на содержании ряда условных шкал твердости.

По **условной шкале Бринелля (HB)** твердость (число твердости) измеряют, вдавливая стальной закаленный шарик (диаметром 10 мм, 5 мм, 2,5 мм) в испытуемый образец, с помощью отношения усилия (нагрузки) F на шарик k площади S отпечатка, остающегося на образце:

$$HB = F / S = \frac{F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.15)$$

где D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм; F – нагрузка на шарик, измеряемая в ньютонах (Н).

По **условной шкале Виккерса (HV)** число твердости определяют, вдавливая в испытуемый образец алмазный наконечник, имеющий форму четырехгранной пирамиды (с углом при вершине 136°), с приложением усилия F от 49 Н (5 кгс) до 980 Н (100 кгс) в течение времени выдержки 10 с, 15 с, 20 с. После приложения усилия с помощью микроскопа измеряется длина диагоналей на отпечатке d_1 , d_2 . Число твердости по Виккерсу определяется по формуле

$$HV = 1,854 \cdot F / d^2, \quad (2.16)$$

где $d = (d_1 + d_2)/2$.

При измерении твердости по **Роквеллу (HR)** стандартный наконечник (стальной шарик или алмазный конус) вдавливается с помощью прессов Роквелла в испытуемый образец под действием двух усилий: предварительного F_0 и общего F , причем $F = F_0 + F_1$. Пресс Роквелла имеет три шкалы (A, B, C). Измерение твердости по шкалам A и C производится путем вдавливания в образец алмазного наконечника (конус с углом 120°). При измерении по шкале A $F_0 = 98$ Н (10 кгс), $F_1 = 1372$ Н (140 кгс), $F_0 = 1470$ Н (150 кгс). Для сравнительно мягких материалов используется шкала B. При этом используется стальной шарик диаметром 1,588 мм под действием нагрузок $F_0 = 98$ Н, $F_0 = 882$ Н (90 кгс), $F_0 = 980$ Н (100 кгс). Твердость по Роквеллу обозначают в зависимости от применяемой шкалы HRA,

Глава 2. Единицы физических величин

HRB, HRC с указанием числа твердости, которое определяется в случае шкал А и С по формуле

$$HR = 100 - (h - h_0) / 0,002, \quad (2.17)$$

в случае шкалы В

$$HRB = 130 - (h - h_0) / 0,002, \quad (2.18)$$

где h_0 – глубина внедрения наконечника в образец под действием предварительного усилия, h – глубина внедрения наконечника в образец под действием общего усилия, измеренного после снятия нагрузки F_1 , с оставлением предварительной нагрузки.

В России имеется специальный эталон воспроизведения твердости по шкалам HRC и HRC_Э (шкала Супер-Роквелла). Для пересчета шкал HRC и HRC_Э существуют специальные таблицы. В настоящее время требования к твердости рекомендуется указывать числа по шкале HRC_Э.

ГЛАВА 3

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

3.1. Термины и определения

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

- 1. Приведенное определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нем учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины).
- 2. От термина «измерение» происходит термин «измерять», которым широко пользуются на практике. Все же нередко применяются такие термины, как «мерить», «обмерять», «замерять», «промерять», не вписывающиеся в систему метрологических терминов. Их применять не следует. Не следует также применять такие выражения, как «измерение значения» (например, мгновенного значения напряжения или его среднего квадратического значения), так как значение величины – это уже результат измерений.
- 3. В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины) практикуется оценивание таких величин по условным шкалам.

В простейшем случае, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и

Глава 3. Принципы и методы измерения физических величин

других параметров детали). С помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

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

➤ Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными.

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

➤ Ряд неравноточных измерений обрабатывают с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

➤ Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производится один раз.

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, то есть состоящее из ряда однократных измерений.

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

➤ Измерение длины детали при нормальной температуре. Измерение размеров земельного участка.

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины.

➤ 1. Терминоэлемент «динамическое» относится к измеряемой величине.
2. Строго говоря, все физические величины подвержены тем или иным изменениям во времени. В этом убеждает применение все более и более чувствительных средств измерений, которые дают возможность обнаруживать изменение величин, ранее считавшихся постоянными, поэтому разделение измерений на динамические и статические является условным.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

➤ Понятие *абсолютное измерение* применяется как противоположное понятию *относительное измерение* и рассматривается как измерение величины в

Глава 3. Принципы и методы измерения физических величин

ее единицах. В таком понимании это понятие находит все большее и большее применение.

Измерение силы $F = mg$ основано на измерении основной величины – массы m и использовании физической постоянной g (в точке измерения массы).

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

➤ Измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве эталонной меры активности.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно.

➤ Термин *прямое измерение* возник как противоположный термину *косвенное измерение*. Строго говоря, измерение всегда прямое и рассматривается как сравнение величины с ее единицей. В этом случае лучше применять термин *прямой метод измерений*.

Измерение длины детали микрометром; измерение силы тока амперметром; измерение массы на весах.

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

➤ Во многих случаях вместо термина *косвенное измерение* применяют термин *косвенный метод измерений*.

Определение плотности D тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением $D = \frac{m}{0,25\pi d^2 h}$.

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

➤ Для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин.

Значение массы отдельных гирь набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

Совместные измерения – производимые одновременно измерения двух или нескольких неодноименных величин для определения зависимости между ними.

Глава 3. Принципы и методы измерения физических величин

Наблюдение при измерении – операции, проводимые при измерении и имеющие целью своевременно и правильно произвести отсчет.

- Не следует заменять термин *измерение* термином *наблюдение*.

Измерительный сигнал – сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине.

Измерительная информация – информация о значениях физических величин.

Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

Объект измерения – тело (физическая система, процесс, явление и т.д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

- Коленчатый вал, у которого измеряют диаметр; технологический процесс, во время которого измеряют температуру; спутник Земли, координаты которого измеряются. Это все объекты измерения.

Область измерений – совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой.

- Выделяют ряд областей измерений: механические, магнитные, акустические, измерения ионизирующих излучений и др.

Вид измерений – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

- В области электрических и магнитных измерений могут быть выделены как виды измерений: измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции и др.

Подвид измерений – часть вида измерений, выделяющаяся особенностями измерений однородной величины (по диапазону, по размеру величины и др.).

- При измерении длины выделяют измерения больших длин (в десятках, сотнях, тысячах километров) или измерения сверхмалых длин – толщин пленок.

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений.

- 1. Применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения.

2. Применение эффекта Пельтье для измерения поглощенной энергии ионизирующих излучений.
3. Применение эффекта Доплера для измерения скорости.
4. Использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием.

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

➤ Метод измерений обычно обусловлен устройством средств измерений.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизведимой мерой.

- 1. Измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известным значением).
- 2. Измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с известной э.д.с. нормального элемента.

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

➤ Измерения электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием.

Метод измерений замещением – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

➤ Взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

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

➤ Измерения, выполняемые при поверке мер длины сравнением с эталонной мерой на компараторе.

Контактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения.

- 1. Измерение диаметра вала измерительной скобой или контроль проходным и непроходным калибрами.
- 2. Измерение температуры тела термометром.

Бесконтактный метод измерений – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения.

- Измерение температуры в доменной печи пирометром; измерение расстояния до объекта радиолокатором.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

Методика выполнения измерений – установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом.

- Обычно методика измерений регламентируется каким-либо нормативно-техническим документом.

Результат измерения физической величины – значение величины, полученное путем ее измерения.

Неисправленный результат измерения – значение величины, полученное при измерении до введения в него поправок, учитывающих систематические погрешности.

Исправленный результат измерения – полученное при измерении значение величины и уточненное путем введения в него необходимых поправок на действие систематических погрешностей.

Ряд результатов измерений – значения одной и той же величины, последовательно полученные из следующих друг за другом измерений.

Среднее взвешенное значение величины – среднее значение величины из ряда неравноточных измерений, определенное с учетом веса каждого единичного измерения.

- Среднее взвешенное значение иногда называют *средним весовым*.

Вес результата измерений – положительное число (p), служащее оценкой доверия к тому или иному отдельному результату измерения, входящему в ряд неравноточных измерений.

➤ В большинстве случаев принято считать, что веса входящих в ряд неравноточных измерений обратно пропорциональны квадратам их средних квадратических погрешностей, то есть $p_i = 1/S^2_i$. Для простоты обычно результату с большей погрешностью приписывают вес, равный единице ($p = 1$), а остальные веса находят по отношению к нему.

Нормальные условия измерений – условия измерения, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.

➤ Нормальные условия измерений устанавливаются в нормативных документах на средства измерений конкретного типа или по их поверке (калибровке).

Нормальное значение влияющей величины – значение влияющей величины, установленное в качестве номинального.

➤ При измерении многих величин нормируется нормальное значение температуры 20 °C или 293 K, а в других случаях нормируется 296 K (23 °C). На нормальное значение, к которому приводятся результаты многих измерений, выполненные в разных условиях, обычно рассчитана основная погрешность средств измерений.

Нормальная область значений влияющей величины – область значений влияющей величины, в пределах которой изменением результата измерений под ее воздействием можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности.

➤ Нормальная область значений температуры при поверке нормальных элементов класса точности 0,005 в термостате не должна изменяться более чем на $\pm 0,05$ °C от установленной температуры 20 °C, то есть быть в диапазоне от 19,95 до 20,05 °C.

Рабочая область значений влияющей величины – область значений влияющей величины, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний средства измерений.

Рабочие условия измерений – условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей.

➤ 1. Для измерительного конденсатора нормируют дополнительную погрешность на отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной.

2. Для амперметра нормируют изменение показаний, вызванное отклонением частоты переменного тока от 50 Гц (50 Гц в данном случае принимают за нормальное значение частоты).

Рабочее пространство – часть пространства (окружающего средство измерений и объект измерений), в котором нормальная

Глава 3. Принципы и методы измерения физических величин

область значений влияющих величин находится в установленных пределах.

Предельные условия измерений – условия измерений, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерений может выдержать без разрушений его метрологических характеристик.

3.2. Основные вопросы для изучения темы

В чем заключаются основные постулаты теории измерений?

Как и любая другая наука, метрология строится на основе ряда основополагающих постулатов, описывающих ее исходные аксиомы. Приведенные ниже постулаты будут в дальнейшем уточняться и дополняться [5].

Первым постулатом метрологии является постулат α : *в рамках принятой модели объекта исследования существует определенная физическая величина и ее истинное значение*. Если считать, что деталь представляет собой цилиндр (модель – цилиндр), то она имеет диаметр, который может быть измерен. Если же деталь нельзя считать цилиндрической, например, ее сечение представляет собой эллипс, то измерять ее диаметр бессмысленно, поскольку измеренное значение не несет полезной информации о детали. И, следовательно, в рамках новой модели диаметр не существует. Измеряемая величина существует лишь в рамках принятой модели, то есть имеет смысл только до тех пор, пока модель признается адекватной объекту. Так как при различных целях исследований данному объекту могут быть сопоставлены различные модели, то из постулата α вытекает следствие α_1 : *для данной физической величины объекта измерения существует множество измеряемых величин (и соответственно их истинных значений)*.

Из первого постулата метрологии следует, что измеряемому свойству объекта измерений должен соответствовать некоторый параметр его модели. Данная модель в течение времени, необходимого для измерения, должна позволять считать этот параметр неизменным. В противном случае измерения не могут быть проведены. Указанный факт описывается постулатом β : *истинное значение измеряемой величины постоянно*.

Выделив постоянный параметр модели, можно перейти к измерению соответствующей величины. Для переменной физической величины необходимо выделить или выбрать некоторый постоянный параметр и измерить его. В общем случае такой постоянный параметр вводится с помощью некоторого функционала. Примером таких постоянных параметров переменных во времени сигналов, вводимых посредством функционалов, являются средневыпрямленные или среднеквадратические значения. Данный аспект отражается в следствии β_1 : *для измерения переменной физической величины необходимо определить ее постоянный параметр – измеряемую*

величину.

При построении математической модели объекта измерения неизбежно приходится идеализировать те или иные его свойства. Модель никогда не может полностью описывать все свойства объекта измерений. Она отражает с определенной степенью приближения некоторые из них, имеющие существенное значение для решения данной измерительной задачи. Модель строится до измерения на основе априорной информации об объекте и с учетом цели измерения. Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а его значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного измерения, принимается в качестве истинного значения данной измеряемой величины. Эта неизбежная идеализация, принятая при построении модели объекта измерения, обусловливает неизбежное несоответствие между параметром модели и реальным свойством объекта, которое называется пороговым. Принципиальный характер понятия «пороговое несоответствие» устанавливается **постулатом у:** *существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта (пороговое несоответствие измеряемой величины).* Пороговое несоответствие принципиально ограничивает достижимую точность измерений при принятом определении измеряемой физической величины.

Изменения и уточнения цели измерения, в том числе и такие, которые требуют повышения точности измерений, приводят к необходимости изменять или уточнять модель объекта измерений и переопределять понятие измеряемой величины. Основной причиной переопределения является то, что пороговое несоответствие ранее принятого определения не позволяет повысить точность измерения до уровня требуемой. Вновь введенный измеряемый параметр модели также может быть измерен лишь с погрешностью, которая в лучшем случае равна погрешности, обусловленной пороговым несоответствием. Поскольку принципиально невозможно построить абсолютно адекватную модель объекта измерения, то нельзя устраниТЬ пороговое несоответствие между измеряемой физической величиной и описывающим ее параметром модели объекта измерений. Отсюда вытекает важное **следствие у₁:** *истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.*

Модель можно построить только при наличии априорной информации об объекте измерения. При этом, чем больше информации, тем более адекватной будет модель и соответственно точнее и правильнее будет выбран ее параметр, описывающий измеряемую физическую величину. Следовательно, увеличение априорной информации уменьшает пороговое несоответствие. Данная ситуация отражается в **следствии у₂:** *достижимая точность*

измерения определяется априорной информацией об объекте измерения.

Из этого следствия вытекает, что при отсутствии априорной информации измерение принципиально невозможно. В то же время максимально возможная априорная информация заключается в известной оценке измеряемой величины, точность которой равна требуемой. В этом случае необходимости в измерении нет.

Каковы основные операции процесса измерения?

Суть простейшего измерения состоит в сравнении размера физической величины Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$. Условием реализации процедуры прямого измерения является выполнение следующих элементарных операций [4]:

- измерительного преобразования измеряемой физической величины X в другую физическую величину Q , однородную или неоднородную с ней;
- воспроизведения физической величины Q_m заданного размера $N[Q]$, однородной с преобразованной величиной Q ;
- сравнения однородных физических величин: преобразованной Q и воспроизводимой мерой $Q_m = N[Q]$.

Структурная схема измерения показана на рис. 3.1. Для получения результата измерения необходимо обеспечить выполнение при $N = q$ условия:

$$\Delta = Q - q[Q] = F(X) - q[Q] = \min(F[X] - N[Q]), \quad (3.1)$$

то есть погрешность сравнения величин Q и Q_m должна быть минимизирована. В этом случае результат измерений находится как

$$X = F^{-1}\{q[Q]\}, \quad (3.2)$$

где F^{-1} – операция, обратная операции F , осуществляющей при измерительном преобразовании.

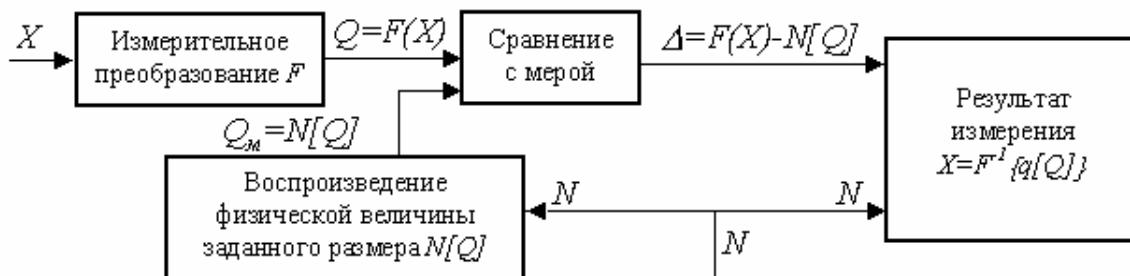


Рис. 3.1. Структурная схема измерения

Элементы процесса измерения: модель объекта измерения

Объект измерения – это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами. Он обладает многими свойствами и находится в многосторонних и сложных связях с другими объектами. Человек (субъект измерения) принципиально не в состоянии представить себе объект целиком со всеми его свойствами и связями. Вследствие этого взаимодействие субъекта с объектом возможно только на основе математической модели объекта.

Математическая модель объекта измерения – это совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает интересующие субъекта свойства объекта измерения.

Модель объекта измерения строится до выполнения измерения в соответствии с решаемой задачей на основе априорной информации об объекте и условиях измерения. Модель объекта измерения должна удовлетворять следующим требованиям:

- погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерения, не должна превышать 10% предельно допускаемой погрешности измерения;
- составляющая погрешности измерения, обусловленная нестабильностью измеряемой физической величины в течение времени, необходимого для проведения измерения, не должна превышать 10% предельно допускаемой погрешности.

Если выбранная модель не удовлетворяет этим требованиям, то следует перейти к другой модели объекта измерений.

Априорная информация, то есть информация об объекте измерения, известная до проведения измерения, является важнейшим фактором, обуславливающим его эффективность. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а, следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, то есть при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Указанная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а ее значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного эксперимента, принимается в качестве истинного значения данной величины.

Модель объекта измерения не обязательно должна быть математической. Ее характер должен определяться видом и свойствами объекта измерений, а также целью измерений. Моделью может служить любое приближенное описание объекта, которое позволяет выделить параметр модели, являющийся измеряемой величиной и отражающий то свойство объекта измерений, которое необходимо оценить для решения измерительной задачи. Модель должна достаточно хорошо отражать две группы свойств объекта измерений: определяемые при измерении и влияющие на результат измерения.

Элементы процесса измерения: условия измерения

В процессе измерения важную роль играют **условия измерения** – совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений. *Влияющая величина* – это физическая величина, не измеряемая данным средством измерения, но оказывающая влияние на его результаты.

Изменение условий измерения приводит к изменению состояния объекта измерения. Влияние условий измерения на средство измерения проявляется в изменении его метрологических характеристик.

В соответствии с установленными для конкретных ситуаций диапазонами значений влияющих величин различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений.

Нормальные условия измерений – условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения, то есть в области, где изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности. Нормальные условия измерений задаются в нормативно-технической документации на средство измерений. При нормальных условиях определяется основная погрешность данного средства измерения.

Рабочими называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей, где нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний средства измерений.

Предельные условия измерений – это условия, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерения может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

Основные этапы измерения: формулировка и описание

Первым этапом любого измерения является **постановка измерительной задачи**. Он включает в себя:

- сбор данных об условиях измерения и исследуемой физической величине, то есть накопление априорной информации об объекте измерения и ее анализ;
- формирование модели объекта и определение измеряемой величины, что является наиболее важным, особенно при решении сложных измерительных задач. Измеряемая величина определяется с помощью принятой модели как ее параметр или характеристика. В простых случаях, то есть при измерениях невысокой точности, модель объекта в явном виде не выделяется, а пороговое несоответствие пренебрежимо мало;
- постановку измерительной задачи на основе принятой модели объекта измерения;
- выбор конкретных величин, посредством которых будет находиться значение измеряемой величины;
- формулирование уравнения измерения.

Вторым этапом процесса измерения является **планирование измерения**. В общем случае оно выполняется в такой последовательности:

- выбор методов измерений непосредственно измеряемых величин и возможных типов средств измерений;
- априорная оценка погрешности измерения;
- определение требований к метрологическим характеристикам средств измерений и условиям измерений;
- выбор средств измерений в соответствии с указанными требованиями;
- выбор параметров измерительной процедуры (числа наблюдений для каждой измеряемой величины, моментов времени и точек выполнения наблюдений);
- подготовка средств измерений к выполнению экспериментальных операций;
- обеспечение требуемых условий измерений или создание возможности их контроля.

Эти первые два этапа являются подготовкой к измерениям, которая производится на основе априорной информации.

Третий, главный этап измерения – **измерительный эксперимент**. В узком смысле он является отдельным измерением.

В общем случае последовательность действий во время этого этапа следующая:

- взаимодействие средств и объекта измерений;
- преобразование сигнала измерительной информации;
- воспроизведение сигнала заданного размера;
- сравнение сигналов и регистрация результата.

Последний этап измерения – **обработка экспериментальных данных**. В общем случае она осуществляется в последовательности, которая отражает логику решения измерительной задачи:

- предварительный анализ информации, полученной на предыдущих этапах измерения;
- вычисление и внесение возможных поправок на систематические погрешности;
- формулирование и анализ математической задачи обработки данных;
- построение или уточнение возможных алгоритмов обработки данных, то есть алгоритмов вычисления результата измерения и показателей его погрешности;
- анализ возможных алгоритмов обработки и выбор одного из них на основании известных свойств алгоритмов, априорных данных и предварительного анализа экспериментальных данных;
- проведение вычислений согласно принятому алгоритму, в итоге которых получают значения измеряемой величины и погрешностей измерений;
- анализ и интерпретация полученных результатов;
- запись результата измерений и показателей погрешности в соответствии с установленной формой представления.

Некоторые пункты данной последовательности могут отсутствовать при реализации конкретной процедуры обработки результатов измерений.



Примеры прямых и косвенных измерений

Прямое измерение условно можно выразить формулой:

$$Y = X, \quad (3.3)$$

где Y – искомое значение измеряемой величины; X – значение, непосредственно получаемое из опытных данных.

К этому виду измерений относятся измерения различных физических величин при помощи приборов, градуированных в установленных единицах. Например, измерение массы при помощи весов, силы тока – амперметром, температуры – термометром.

При **косвенных измерениях** числовое значение измеряемой величины определяется путем вычисления по формуле

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (3.4)$$

где Y – искомое значение измеряемой величины; X_1, X_2, \dots, X_n – значения измеренных величин.

По виду функциональной зависимости F различают косвенные измерения:

- с линейной зависимостью $Y = \sum_{i=1}^n K_i X_i$, где K_i – постоянный коэффициент i -го аргумента;
- с нелинейной зависимостью $Y = \prod_{i=1}^n f(X_i)$, где $f(X_i)$ – некоторые функции;
- измерения с зависимостями смешанного типа $Y = \sum_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^{n_j} f(X_i) \right]$.

В качестве примера косвенных измерений можно указать на измерение сопротивления в цепях постоянного тока с помощью амперметра и вольтметра (рис. 3.2).

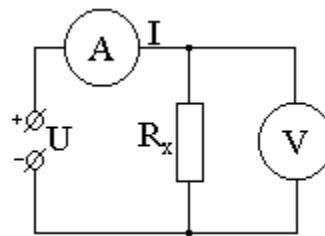


Рис. 3.2. Измерение сопротивления амперметром и вольтметром

Сопротивление постоянному току какого-либо приемника можно определить, измеряя напряжение U на зажимах приемника и силу тока I и используя известную закономерность – закон Ома:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.5)$$

Примеры совместных и совокупных измерений

При **совместных измерениях** значения разноименных величин определяются путем решения системы уравнений, связывающих значения искомых величин с непосредственно измеренными величинами, то есть путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} F_1(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, X_1^I, X_2^I, X_3^I, \dots) = 0; \\ F_2(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, X_1^{II}, X_2^{II}, X_3^{II}, \dots) = 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

В уравнениях (3.6) Y_1, Y_2, Y_3, \dots – искомые величины; X_1, X_2, X_3, \dots – непосредственно измеренные величины.

В качестве примера совместных измерений можно привести определение коэффициентов в формуле, связывающей сопротивление резистора с его температурой:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2], \quad (3.7)$$

где R_t – сопротивление резистора при температуре t °C; R_{20} – сопротивление резистора при температуре 20°C; α , β и R_{20} – искомые величины.

Измеряя сопротивление резистора при различных температурах (t_1, t_2 и t_3), определяемых по термометру, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_t^I = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]; \\ R_t^{II} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]; \\ R_t^{III} = R_{20} [1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]. \end{cases} \quad (3.8)$$

Решая эту систему уравнений, найдем значения искомых величин R_{20} , α и β .

Отличие **совокупных измерений** от совместных состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно определяются несколько одноименных величин, а при совместных – разноименных.

Примером совокупных измерений может служить определение потерь на гистерезис и на вихревые токи в ферромагнитном материале при его переменном намагничивании. Зависимость суммарных потерь от частоты перемагничивания можно представить в виде:

$$\begin{cases} P_{z, \epsilon}^I = af_1 + bf_1^2; \\ P_{z, \epsilon}^{II} = af_2 + bf_2^2. \end{cases} \quad (3.9)$$

Измеряют суммарные потери $P_{\text{с}, \text{в}}^I$ и $P_{\text{с}, \text{в}}^{II}$ при двух частотах f_1 и f_2 соответственно и при одном и том же максимальном значении магнитной индукции. Решая систему (3.9), находят коэффициенты a и b , что позволяет при заданной частоте f_1 вычислить потери на гистерезис af_1 и на вихревые токи bf_1^2 .

По каким признакам классифицируются методы измерений?

Методы измерения можно классифицировать по различным признакам. Для метрологического анализа более важными являются традиционные классификации, основанные на следующих признаках [4]:

1. **Физический принцип**, положенный в основу измерения. По нему все методы измерений делятся на электрические, магнитные, акустические, оптические, механические и т.д.
2. **Режим взаимодействия средства и объекта измерений**. В этом случае все методы измерений подразделяются на статические и динамические.
3. **Вид измерительных сигналов**, применяемый в средстве измерения. В соответствии с ним методы делятся на аналоговые и цифровые.

Наиболее разработанной является классификация по совокупности приемов использования принципов и средств измерений. По этой классификации различают метод непосредственной оценки и методы сравнения (рис. 3.3). Более правильно говорить об опосредованном и непосредственном сравнении с мерой. При этом непосредственным и опосредованным сравнение может быть как во времени, так и в отношении физической природы измеряемых величин.

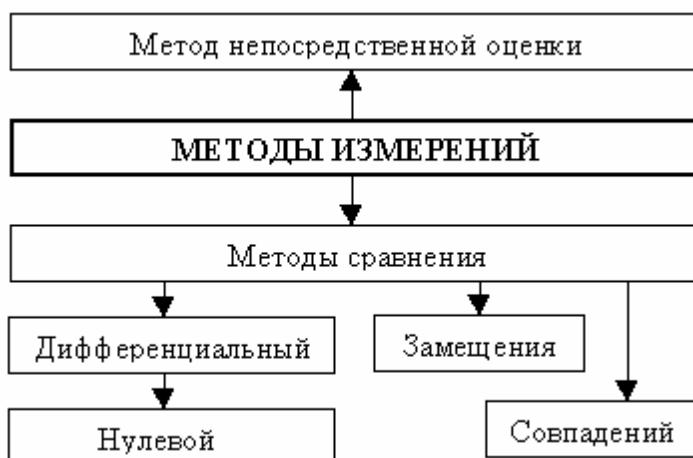


Рис. 3.3. Классификация методов измерения

Сущность метода непосредственной оценки состоит в том, что о значении измеряемой величины судят по показанию одного (прямые измерения) или нескольких (косвенные измерения) средств измерений, которые заранее проградуированы в единицах измеряемой величины или единицах других величин, от которых она зависит. Это наиболее распространенный метод измерения. Его реализуют большинство средств измерений.

Простейшими примерами метода непосредственной оценки могут служить измерения напряжения электромеханическим вольтметром магнитоэлектрической системы или частоты импульсной последовательности методом дискретного счета, реализованным в электронно-счетном частотомере.

Другую группу образуют *методы сравнения*: дифференциальный, нулевой, совпадений, замещения. К ним относятся все те методы, при которых измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Следовательно, отличительной особенностью этих методов сравнения является непосредственное участие в процессе измерения.

Дифференциальный и нулевой методы измерения: описание и примеры

При **дифференциальном методе** измеряемая величина X сравнивается непосредственно или косвенно с величиной X_m , воспроизводимой мерой. О значении величины X судят по измеряемой прибором разности $\Delta X = X - X_m$ и по известной величине X_m , воспроизводимой мерой. Следовательно, $X = X_m + \Delta X$. При дифференциальном методе производится неполное уравновешивание измеряемой величины. Он сочетает в себе часть признаков метода непосредственной оценки и может дать весьма точный результат измерения, если только измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, мало отличаются друг от друга. Например, если разность этих двух величин составляет 1% и измеряется с погрешностью до 1%, то тем самым погрешность измерения искомой величины уменьшается до 0,01% (если не учитывать погрешность меры).

Примером дифференциального метода может служить измерение сопротивления, показанное на рис. 3.4.

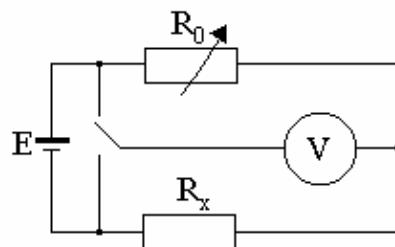


Рис. 3.4. Измерение сопротивления дифференциальным методом

Вольтметр V включается с помощью переключателя P в цепь с измеряемым сопротивлением R_x или в цепь с регулируемым потенциометром (мерой) R_0 . При достижении одинаковых показаний вольтметра ($R_x=R_0$) регистрируется искомое значение R_x .

Нулевой метод является разновидностью дифференциального метода. Его отличие состоит в том, что результирующий эффект сравнения двух величин доводится до нуля. Это контролируется специальным измерительным прибором высокой точности – нуль-индикатором. В данном случае значение измеряемой величины равно значению, которое воспроизводит мера. Высокая чувствительность нуль-индикаторов, а также выполнение меры с высокой точностью позволяет получить малую погрешность измерения.

Пример нулевого метода – взвешивание на весах, когда на одном плече находится взвешиваемый груз, а на другом – набор эталонных грузов.

Другой пример – измерение активного сопротивления мостом постоянного тока (рис. 3.5).

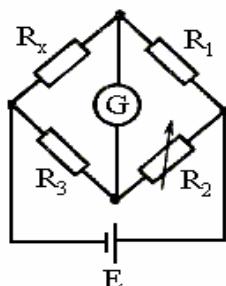


Рис. 3.5. Схема измерения сопротивления нулевым методом

Мостовая схема оказывается полностью уравновешенной (гальванометр G показывает нуль), когда выполняется следующее условие:

$$R_x R_2 = R_1 R_3. \quad (3.10)$$

Таким образом, при полном уравновешивании искомая величина равна:

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}. \quad (3.11)$$

Методы замещения и совпадений: описание и примеры

Метод замещения заключается в поочередном измерении прибором искомой величины и выходного сигнала меры, однородного с измеряемой величиной. По результатам этих измерений вычисляется искомая величина. Поскольку оба измерения производятся одним и тем же прибором в одинаковых внешних условиях, а искомая величина определяется по отношению показаний прибора, погрешность результата измерения уменьшается в значительной мере. Так как погрешность прибора неодинакова в различных точках шкалы, наибольшая точность измерения получается при одинаковых показаниях прибора.

Пример метода замещения – измерение большого электрического активного сопротивления путем поочередного измерения силы тока, протекающего через контролируемый и образцовый резисторы. Измерение в этом случае распадается на два этапа, и результат определяется по двум измерениям: с участием измеряемого сопротивления резистора R_x на первом этапе и меры R_h – на втором (рис. 3.6).

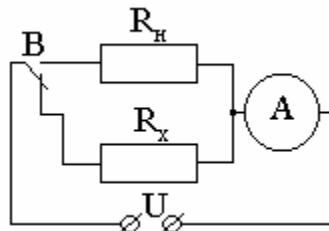


Рис. 3.6. Схема измерения сопротивления методом замещения

При разных положениях переключателя B по показанию амперметра A получены значения токов:

$$I_x = \frac{U}{R_x} \text{ и } I_h = \frac{U}{R_h}. \quad (3.12)$$

Измеряемая величина определяется из соотношения:

$$R_x = \frac{I_h}{I_x} R_h. \quad (3.13)$$

Питание цепи при измерениях должно осуществляться от одного и того же источника постоянного тока. Выходное сопротивление источника тока и измерительного прибора – амперметра должно быть очень мало по сравнению с измеряемыми сопротивлениями.

При **методе совпадений** разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют, используя

совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Примером может служить измерение частоты сигнала при помощи электронно-лучевого осциллографа. Измерение частоты в общем случае производится путем сравнения исследуемых колебаний с колебаниями известной частоты. Удобным приемом является одновременная фиксация на экране двухлучевого осциллографа двух колебаний, частота одного из которых заранее известна.

Метод противопоставления: определение и пример

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

В качестве примера рассмотрена измерительная цепь, изображенная на рис. 3.7.

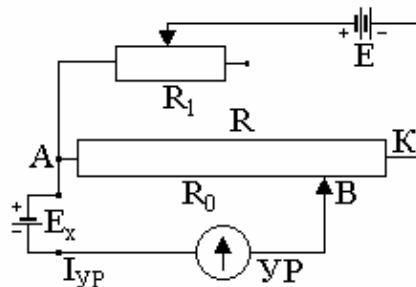


Рис. 3.7. Схема измерения эдс методом противопоставления

Резистор R включен последовательно с реостатом R_1 и источником тока E . К зажимам A и B через указатель равновесия $УР$ (преобразователь сравнения) присоединяется источник измеряемой эдс E_x . Полярность включения E_x и E должна быть такой, как показано на рис. 3.7, чтобы в контуре, состоящем из E_x , $УР$ и R_0 эдс E_x и напряжение U_{AB} на участке резистора с сопротивлением R_0 были направлены встречно. Если падение напряжения U_{AK} на всем сопротивлении резистора R больше E_x , то, перемещая движок B , можно найти такое его положение, при котором стрелка указателя равновесия не будет отклоняться. Это явится свидетельством того, что ток $I_{УР}$ в цепи $УР$ в пределах его чувствительности равен нулю, а, следовательно, $U_{AB}=E_x$. Значение U_{AB} должно быть известным. В данном примере две однородные величины – измеряемая и известная – непосредственно противопоставляются друг другу, и по отсутствию тока, вызываемого этими величинами в замкнутой цепи, судят о значении измеряемой величины.

ГЛАВА 4

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Термины и определения

Сходимость результатов измерений – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

➤ Сходимость измерений двух групп многократных измерений может характеризоваться размахом, средней квадратической или средней арифметической погрешностью.

Воспроизводимость результатов измерений – близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, влажности и др.).

➤ Воспроизводимость измерений может характеризоваться средними квадратическими погрешностями сравниваемых рядов измерений.

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

- 1. Истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях.
- 2. На практике используют действительное значение величины X_o , в результате чего погрешность измерения $\Delta X_{изм}$ определяют по формуле $\Delta X_{изм} = X_{изм} - X_o$; где $X_{изм}$ – измеренное значение величины.
- 3. Синонимом термина *погрешность измерения* является термин *ошибка измерения*, применять который не рекомендуется как менее удачный.

Абсолютная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

Абсолютное значение погрешности – значение погрешности без учета ее знака (модуль погрешности).

- Необходимо различать термины *абсолютная погрешность* и *абсолютное значение погрешности*.

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

- Относительную погрешность в долях или процентах находят из отношений $\delta = \frac{\Delta X}{X}$, или $\delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%$, где ΔX – абсолютная погрешность измерений; X – действительное или измеренное значение величины.

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

- В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на постоянные, прогрессивные, периодические и погрешности, изменяющиеся по сложному закону.

Постоянные погрешности – погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивные погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Инструментальная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Погрешность метода измерений – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

➤ 1. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Погрешность метода иногда называют *теоретической погрешностью*.

2. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

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

➤ Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

Субъективная погрешность измерения – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора.

➤ 1. Встречаются операторы, которые систематически опаздывают (или опережают) снимать отсчеты показаний средств измерений.

2. Иногда субъективную погрешность называют *личной погрешностью* или *личной разностью*.

Неисключенная систематическая погрешность – составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

➤ 1. Иногда этот вид погрешности называют *неисключенный остаток (остатки) систематической погрешности*.

2. Неисключенная систематическая погрешность характеризуется ее границами. Границы неисключенной систематической погрешности θ при числе слагаемых $N \leq 3$ вычисляют по формуле $\theta = \pm \sum_{i=1}^N |\theta_i|$, где θ_i – граница i -ой составляющей неисключенной систематической погрешности.

3. При числе неисключенных систематических погрешностей $N \geq 4$ вычисления проводят по формуле $\theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}$, где K – коэффициент зависимости отдельных неисключенных систематических погрешностей от выбранной доверительной вероятности P при их равномерном распределении (при $P = 0,99$; $K = 1,4$). Здесь θ рассматривается как доверительная квазислучайная погрешность.

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

Рассеяние результатов в ряду измерений – несовпадение результатов измерений одной и той же величины в ряду равноточных измерений, как правило, обусловленное действием случайных погрешностей.

➤ 1. Количественную оценку рассеяния результатов в ряду измерений вследствие действия случайных погрешностей обычно получают после введения поправок на действие систематических погрешностей.

2. Оценками рассеяния результатов в ряду измерений могут быть: размах, средняя арифметическая погрешность (по модулю), средняя квадратическая погрешность или стандартное отклонение (среднее квадратическое отклонение, экспериментальное среднее квадратическое отклонение), доверительные границы погрешности (доверительная граница или доверительная погрешность).

Размах результатов измерений – оценка R_n рассеяния результатов единичных измерений физической величины, образующих ряд (или выборку из n измерений), вычисляемая по формуле

$$R_n = X_{\max} - X_{\min},$$

где X_{\max} и X_{\min} – наибольшее и наименьшее значения физической величины в данном ряду измерений.

➤ Рассеяние обычно обусловлено проявлением случайных причин при измерении и носит вероятностный характер.

Средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений – оценка S рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{n-1}},$$

где X_i – результат i -го единичного измерения; \bar{X} – среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

➤ На практике широко распространен термин *среднее квадратическое отклонение* (СКО). Под отклонением понимают отклонение единичных результатов в ряду измерений от их среднего арифметического значения. В метрологии это отклонение называется погрешностью измерений. Если в результаты измерений введены поправки на действие систематических погрешностей, то отклонения представляют собой случайные погрешности. Поэтому с точки зрения упорядочения совокупности терминов, родовым среди которых является термин «погрешность измерения», целесообразно применять термин «средняя квадратическая погрешность» (СКП). При обработке ряда результатов измерений, свободных от систематических погрешностей, СКП и СКО являются одинаковой оценкой рассеяния результатов единичных измерений.

Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического – оценка $S_{\bar{x}}$ случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}},$$

где S – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений, полученная из ряда равноточных измерений; n – число единичных измерений в ряду.

Доверительные границы погрешности результата измерения – наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

➤ 1. Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как $\pm tS$, $\pm tS_{\bar{x}}$, где S , $S_{\bar{x}}$ – средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений; t – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n .

2. При симметричных границах термин может применяться в единственном числе – *доверительная граница*.

3. Иногда вместо термина *доверительная граница* применяют термин *доверительная погрешность* или *погрешность при данной доверительной вероятности*.

Поправка – значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности.

➤ Знак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют *поправкой к значению меры*; поправку, вводимую в показание измерительного прибора, называют *поправкой к показанию прибора*.

Поправочный множитель – числовой коэффициент, на который умножают неисправленный результат измерения с целью исключения влияния систематической погрешности.

➤ Поправочный множитель используют в случаях, когда систематическая погрешность пропорциональна значению величины.

Точность результата измерений – одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения.

➤ Считают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность.

Неопределенность измерений – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

➤ Неопределенность состоит (в основном) из многих составляющих. Некоторые из этих составляющих могут быть оценены экспериментальными стандартными отклонениями в статистически распределенной серии результатов измерений. Другие составляющие, которые также могут быть оценены стандартными отклонениями, базируются на данных эксперимента или другой информации.

Погрешность метода поверки – погрешность применяемого метода передачи размера единицы при поверке.

Погрешность градуировки средства измерений – погрешность действительного значения величины, приписанного той или иной отметке шкалы средства измерений в результате градуировки.

Погрешность воспроизведения единицы физической величины – погрешность результата измерений, выполняемых при воспроизведении единицы физической величины.

➤ Погрешность воспроизведения единицы при помощи государственных эталонов обычно указывают в виде ее составляющих: неисключенной систематической погрешности; случайной погрешности; нестабильности за год.

Погрешность передачи размера единицы физической величины – погрешность результата измерений, выполняемых при передаче размера единицы.

➤ В погрешность передачи размера единицы входят как неисключенные систематические, так и случайные погрешности метода и средств измерений.

Статическая погрешность измерений – погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения.

Динамическая погрешность измерений – погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения.

Промах – погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

➤ Иногда вместо термина «промах» применяют термин *грубая погрешность измерений*.

Предельная погрешность измерения в ряду измерений – максимальная погрешность измерения (плюс, минус), допускаемая для данной измерительной задачи.

➤ Во многих случаях погрешность $3S$ принимают за предельную, то есть $\Delta_{\text{ПР}} = \pm 3S$. При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение погрешности (S – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений).

Погрешность результата однократного измерения – погрешность одного измерения (не входящего в ряд измерений), оцениваемая на основании известных погрешностей средства и метода измерений в данных условиях (измерений).

➤ При однократном измерении микрометром какого-либо размера детали получено значение величины, равное 12,55 мм. При этом еще до измерения известно, что погрешность микрометра в данном диапазоне составляет $\pm 0,01$ мм, и погрешность метода (непосредственной оценки) в данном случае принята равной нулю. Следовательно, погрешность полученного результата будет равна $\pm 0,01$ мм в данных условиях измерений.

Суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений – погрешность результата измерений (состоящая из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей, принимаемых за случайные), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\theta}^2},$$

где $S_\theta = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_i \theta_i^2}$ – средняя квадратическая погрешность суммы неисключенных систематических погрешностей при равномерном распределении (принимаемых за случайные).

➤ Доверительные границы суммарной погрешности $(\Delta X)_\Sigma$ могут быть вычислены по формуле $(\Delta X)_\Sigma = \pm t_\Sigma S_\Sigma$, где $t_\Sigma = \frac{\theta + t S_{\bar{x}}}{S_\theta + S_{\bar{x}}}$; θ – граница суммы неисключенных систематических погрешностей результата измерений; $t \cdot S_{\bar{x}}$ – доверительная граница погрешности результата измерений.

Погрешность средства измерений – разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

➤ 1. Для меры показанием является ее номинальное значение.
2. Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике пользуются ее действительным значением.
3. Приведенное определение понятия «погрешность средства измерений» не противоречит формулировкам, принятым в отечественной метрологической литературе. Однако признать его удовлетворительным нельзя, так как по сути оно не отличается от определения понятия «погрешность измерений», поэтому необходима дальнейшая работа по усовершенствованию определения этого понятия.

Систематическая погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся.

➤ Систематическая погрешность данного средства измерений, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого экземпляра средства измерений этого же типа, вследствие чего для группы однотипных средств измерений систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

Случайная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом.

Абсолютная погрешность средства измерений – абсолютная погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой физической величины.

Относительная погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к результату измерений или к действительному значению измеренной физической величины.

Приведенная погрешность средства измерений – относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона.

- 1. Условно принятное значение величины называют *нормирующим значением*. Часто за нормирующее значение принимают верхний предел измерений.
- 2. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

Основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

Статическая погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

Динамическая погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины.

Погрешность меры – разность между номинальным значением меры и истинным значением воспроизводимой ею величины.

Абсолютная погрешность измерительного прибора – разность между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины.

Стабильность средства измерений – качественная характеристика средства измерений, отражающая неизменность во времени его метрологических характеристик.

➤ В качестве количественной оценки стабильности служит *нестабильность средства измерений*.

Нестабильность средства измерений – изменение метрологических характеристик средства измерений за установленный интервал времени.

➤ 1. Для ряда средств измерений, особенно некоторых мер, нестабильность является одной из важнейших точностных характеристик. Для нормальных элементов обычно нестабильность устанавливается за год.

2. Нестабильность определяют на основании длительных исследований средства измерений, при этом полезны периодические сличения с более стабильными средствами измерений.

Пример: нестабильность нормального элемента характеризуется изменением действительного значения эдс за год. Например, $v_{\text{Н.Э.}} = 2 \text{ мкВ/год}$.

Точность средства измерений – характеристика качества средства измерений, отражающее близость его погрешности к нулю.

➤ Считается, что чем меньше погрешность, тем точнее средство измерений.

Предел допускаемой погрешности средства измерений – наибольшее значение погрешности средств измерений, устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается годным к применению.

➤ 1. При превышении установленного предела погрешности средство измерений признается негодным для применения (в данном классе точности).

2. Обычно устанавливают *пределы допускаемой погрешности*, то есть границы зоны, за которую не должна выходить погрешность.

Пример: для 100-миллиметровой концевой меры длины 1-го класса точности пределы допускаемой погрешности $\pm 50 \text{ мкм}$.

4.2. Основные вопросы для изучения темы



Классификация погрешностей

Качество результатов измерений характеризуют, указывая их погрешности. Введение понятия «погрешность» требует определения и четкого разграничения трех понятий: истинного и действительного значений измеряемой физической величины и результата измерения.

Истинное значение физической величины – это значение, идеальным образом отражающее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. Оно является абсолютной истиной, к которой стремятся, пытаясь выразить ее в виде числовых значений. На практике это абстрактное понятие приходится заменять понятием «действительное значение».

Действительное значение физической величины – значение, найденное экспериментально и настолько приближенное к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него.

Результат измерения представляет собой приближенную оценку истинного значения величины, найденную путем измерения.

Погрешности измерений классифицируют по следующим признакам [5]:

1. **По характеру проявления** погрешности делятся на случайные, систематические, прогрессирующие и грубые (промахи).
2. **По способу выражения** различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.
3. **В зависимости от места возникновения** различают инструментальные, методические и субъективные погрешности.
4. **По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины** различают аддитивные, мультипликативные и нелинейные погрешности.
5. **По влиянию внешних условий** погрешности делятся на основную и дополнительную.
6. **В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин** погрешности делят на статические и динамические.



Основные характеристики погрешностей

Погрешность измерения описывается определенной математической моделью, выбор которой обуславливается имеющимися априорными сведениями об источниках погрешности, а также данными, полученными в ходе измерений. С помощью выбранной модели определяются характеристики и параметры погрешности, используемые для количественного выражения тех или иных ее свойств.

Характеристики погрешности принято делить на точечные и интервальные. К точечным относятся среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности и предел сверху для модуля систематической погрешности, к интервальным – границы неопределенности результата измерения. Если эти границы определяются как отвечающие некоторой доверительной вероятности, то они называются *доверительными интервалами*. Если же минимально возможные в конкретном случае границы погрешности оценивают так, что погрешность, выходящую за них, встретить нельзя, то они называются *пределными (безусловными) интервалами*.



Методы устранения систематических погрешностей: метод замещения, противопоставления и компенсации по знаку

Метод замещения состоит в такой замене измеряемой величины X_H известной величиной A (мерой), получаемой с помощью регулируемой меры, чтобы показание измерительного прибора сохранилось неизменным. Значение измеряемой величины считывается в этом случае по указателю меры.

При данном методе погрешность недостаточно точного измерительного прибора устраняется, а погрешность измерения определяется только погрешностью самой меры и погрешностью отсчета измеряемой величины по указателю меры.

Пример: измерялось сопротивление резистора R_X омметром малой точности. Результат измерения равен $X = R_X + \Delta_c$, где X и Δ_c – соответственно показание омметра и систематическая погрешность измерения. Заменив R_X магазином сопротивлений и отрегулировав его так, чтобы сохранилось показание омметра, получим $X = R_m + \Delta_c$. Их приведенных двух выражений для X следует, что $R_X = R_m$.

Метод противопоставления применяется в электрорадиоизмерениях для исключения систематических

погрешностей при сравнении измеряемой величины с известной величиной примерно равного значения, воспроизводимой соответствующей образцовой мерой.

Метод компенсации погрешности по знаку используется для устранения систематической погрешности, у которой в зависимости от условий измерения изменяется только знак. При этом методе выполняются два измерения, результаты определяются выражениями:

$$X_1 = X_H + \Delta_C \quad \text{и} \quad X_2 = X_H - \Delta_C, \quad (4.1)$$

где X_H – измеряемая величина.

Среднее значение из полученных результатов $\frac{X_1 + X_2}{2} = X_H$

представляет собой окончательный результат измерения, не содержащий погрешности $\pm \Delta_c$. Этот метод часто используется при измерении экстремальных значений (максимума и нуля) неизвестной физической величины.



Методы уменьшения систематических погрешностей: метод рандомизации и способ симметричных наблюдений

Метод рандомизации основан на принципе перевода систематических погрешностей в случайные. Этот метод позволяет эффективно уменьшать систематическую погрешность (методическую и инструментальную) путем измерения некоторой физической величины рядом однотипных приборов с последующей оценкой результата измерений в виде математического ожидания (среднего арифметического значения) выполненного ряда наблюдений. В данном методе при обработке результатов измерений используются случайные изменения погрешности от прибора к прибору. Уменьшение систематической погрешности достигается и при изменении случайным образом методики и условий проведения измерений.

Пример: Некоторая физическая величина измеряется n раз (число n достаточно велико) однотипными приборами, имеющими систематические погрешности одинакового происхождения. Для одного прибора эта погрешность – величина постоянная, но от прибора к прибору она изменяется случайным образом. Поэтому если измерить неизвестную физическую величину n приборами и затем вычислить математическое ожидание всех результатов, то значение погрешности существенно уменьшится (как в случае усреднения случайной погрешности).

Способ симметричных наблюдений оказывается весьма эффективным при исключении прогрессивной погрешности, являющейся линейной функцией соответствующего аргумента (амплитуды напряжения, времени, температуры и т.д.). Измерения проводят последовательно через одинаковые интервалы изменения аргумента, а обработку полученных результатов осуществляют с учетом равенства среднего значения погрешности любой пары симметричных наблюдений погрешности, соответствующей средней точке данного интервала. Подобным образом удается исключить погрешности измерений, обусловленные постепенным падением уровня напряжения источника питания (аккумулятора, батареи).

Исключение систематических погрешностей путем введения поправок

В ряде случаев систематические погрешности могут быть вычислены и исключены из результата измерения. Для этого используются поправки [4].

Поправка C_j – величина, одноименная измеряемой, которая вводится в результат измерения $X_i = X'_i + \theta_j + C_j$ с целью исключения составляющих систематической погрешности θ_j . При $C_j = -\theta_j$ j -я составляющая погрешности полностью устраняется из результата измерения. Поправки определяются экспериментально или в результате специальных теоретических исследований. Они задаются в виде таблиц, графиков или формул.

Введением одной поправки устраняется влияние только одной составляющей систематической погрешности. Для устранения всех составляющих в результат измерения приходится вводить множество поправок. При этом вследствие ограниченной точности определения поправок случайные погрешности результата измерения накапливаются, и его дисперсия увеличивается. Так как поправка известна с определенной точностью, то она характеризуется статистически – средним значением поправки C и СКО S_c . При исправлении результата X'_i путем введения поправок C_j , где $j = 1, 2, \dots, m$, по формуле

$$X_i = X'_i + \sum_{j=1}^m C_j \quad (4.2)$$

дисперсия исправленного результата

$$S^2 = S_h^2 + \sum_j S_{cj}^2, \quad (4.3)$$

где S_n^2 – оценка дисперсии неисправленного результата; S_{cj}^2 – оценка дисперсии j -й поправки.

Как видно, с одной стороны, уточняется результат измерения, а с другой – увеличивается разброс за счет роста дисперсии.

Максимальные доверительные значения погрешности результата измерения до и после введения поправки равны соответственно:

$$\Delta_1 = \theta_1 + t_p S, \quad \Delta_2 = \theta_2 + t_p S_{\bar{X}} = \theta_1 - C + t_p \sqrt{S^2 + S_c^2}, \quad (4.4)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента.

Поправку имеет смысл вводить до тех пор, пока $\Delta_1 < \Delta_2$. Отсюда следует, что

$$C > t_p S \left[\sqrt{1 + \frac{S_c^2}{S^2}} - 1 \right]. \quad (4.5)$$

Если $S_c/S \ll 1$, то, раскладывая уравнение в степенной ряд, получим $C > 0,5 S_c^2 / S^2$. Из этого неравенства видно, что если оценка среднеквадратического отклонения поправки $S_c \rightarrow 0$, то поправку имеет смысл вводить всегда.

В практических расчетах погрешность результата обычно выражается не более чем двумя значащими цифрами, поэтому поправка, если она меньше пяти единиц младшего разряда, следующего за последним десятичным разрядом погрешности результата, все равно будет потеряна при округлении и вводить ее не имеет смысла.

Аналитическое представление случайных погрешностей

Аналитически случайная погрешность измерений описывается с помощью аппарата теории вероятности и математической статистики. При такой оценке обычно интересуются вероятностью P того, что погрешность результата измерений Δ находится в некотором заданном интервале распределения погрешностей (Δ_{r1}, Δ_{r2}), где Δ_{r1} и Δ_{r2} – соответственно нижняя и верхняя границы интервала. Записывается данная вероятность как $P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2})$ и из математики известно, что в общем случае $0 \leq P \leq 1$.

Для определения значения вероятности $P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2})$ необходимо знать закон $\rho(\Delta)$ распределения случайной погрешности Δ , называемый *плотностью распределения вероятностей* (плотностью вероятностей) случайной погрешности.

При известном законе распределения $\rho(\Delta)$ искомая вероятность определяется по формуле

$$P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2}) = \int_{\Delta_{r1}}^{\Delta_{r2}} \rho(\Delta) d\Delta. \quad (4.6)$$

Из физических представлений следует, что вероятность нахождения погрешности Δ на интервале всех возможных погрешностей измерений, то есть в общем случае на интервале $(-\infty, \infty)$:

$$P(-\infty \leq \Delta \leq \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\Delta) d\Delta = 1. \quad (4.7)$$

Выражение (4.7) называется условием нормирования плотности распределения вероятностей $\rho(\Delta)$. Оно означает, что площадь под графиком любой функции $\rho(\Delta)$ на интервале всех ее значений должна быть равна единице.

В практике измерений наиболее часто используются нормальный закон распределения (Гаусса) и закон распределения Стьюдента.

Нормальный закон распределения погрешностей

Этот закон применяется при следующих предположениях:

- погрешность может принимать непрерывный ряд значений в интервале $\pm\infty$;
- при выполнении значительного числа измерений большие погрешности появляются реже, чем малые, а частота появления погрешностей, идентичных по абсолютной величине и противоположных по знаку, одинакова.

Для нормального закона распределения

$$\rho(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(x - X_u)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4.8)$$

где σ – параметр рассеивания распределения, равный СКО, характеризующий точность выполненных измерений (чем меньше σ , тем выше точность); X_u – центр распределения, равный математическому ожиданию.

На рис. 4.1 представлены графики функции (4.8) для различных значений σ .

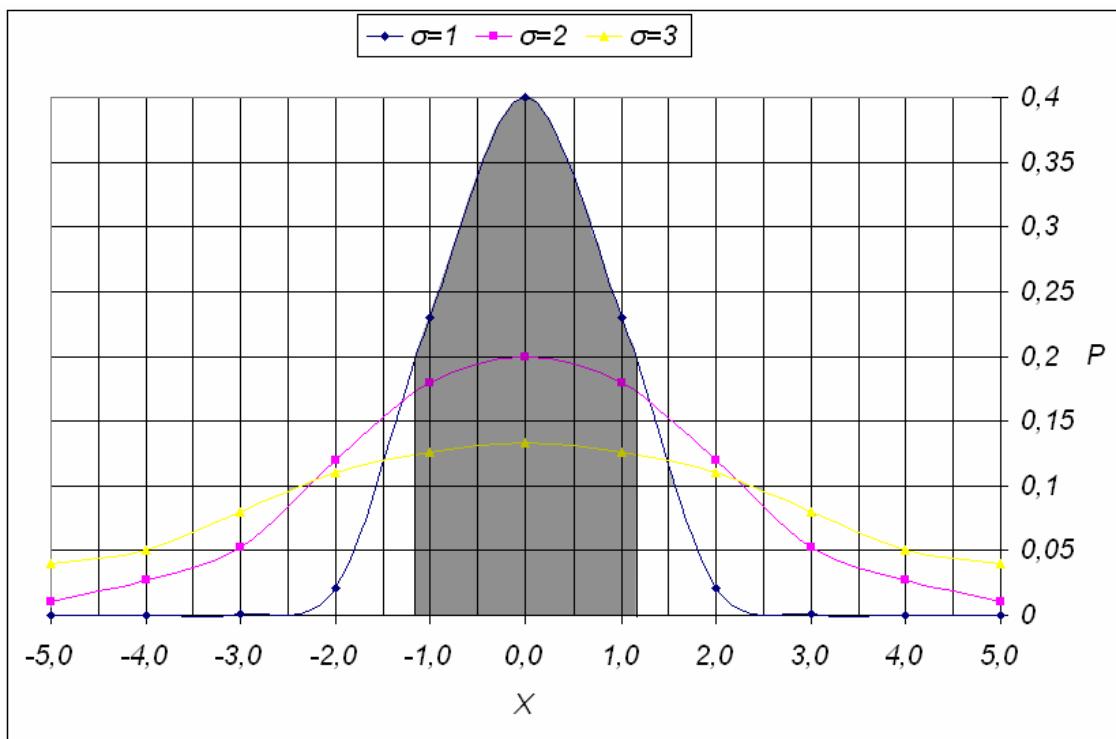


Рис. 4.1. Графики нормального закона распределения плотности вероятности случайных погрешностей

Широкое применение в практической метрологии нормального закона распределения объясняется центральной предельной теоремой теории вероятностей (теоремой Ляпунова), утверждающей, что распределение случайных погрешностей будет близко к нормальному во всех случаях, когда результаты наблюдений формируются под влиянием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных.

При введении новой переменной $t = (x - X_u)/\sigma$ получается нормированное нормальное распределение, интегральная и дифференциальная функции которого соответственно равны:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-0,5t^2} dt; \quad p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5t^2}. \quad (4.9)$$

Нормирование приводит к переносу начала координат в центр распределения и выражению абсциссы в долях СКО.

Определенный интеграл с переменным верхним пределом

$$P(-\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r1}) = \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-0,5t^2} dt \quad (4.10)$$

называют *функцией Лапласа (интегралом вероятности)*. Для нее справедливы следующие равенства:

$$\Phi(-\infty) = -0,5; \quad \Phi(0) = 0; \quad \Phi(+\infty) = 0,5; \quad \Phi(t) = -\Phi(-t).$$

Функция Лапласа используется для определения значений интегральных функций нормальных распределений. Функция $F(t)$ связана с функцией Лапласа формулой $F(t) = 0,5 + \Phi(t)$. Поскольку интеграл в (4.10) не выражается через элементарные функции, то значения функции Лапласа для различных значений t сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,000	0,70	0,516	1,40	0,839	2,25	0,976
0,10	0,080	0,80	0,576	1,50	0,866	2,50	0,988
0,20	0,159	0,90	0,632	1,60	0,890	2,75	0,9940
0,30	0,236	1,00	0,683	1,70	0,911	3,00	0,99730
0,40	0,311	1,10	0,729	1,80	0,928	3,30	0,99903
0,50	0,383	1,20	0,770	1,90	0,943	3,50	0,99953
0,60	0,452	1,30	0,806	2,00	0,955	4,00	0,99994

Ниже приведены значения функции Лапласа для некоторых применяемых на практике интервалов, представленных в долях σ :

$$P\left(-\frac{2}{3}\sigma \leq \Delta \leq \frac{2}{3}\sigma\right) = 0,5; \quad P(-\sigma \leq \Delta \leq \sigma) = 0,683; \quad (4.11)$$

$$P(-3\sigma \leq \Delta \leq 3\sigma) = 0,997; \quad P(-\infty \leq \Delta \leq +\infty) = 1.$$

В соответствии со значениями этих вероятностей погрешность результатов измерений, равная $(2/3)\sigma$, названа равновероятной (поскольку $P = 0,5$). При этом вероятность того, что погрешность не превысит величину σ , равна 0,683. Погрешность, равная 3σ , принята в радиотехнике за максимальную и записывается в виде $M_\sigma = 3\sigma$. При максимальной вероятности из тысячи выполненных измерений только три их погрешности Δ выходят за пределы интервала $(-3\sigma, 3\sigma)$, а вероятность того, что погрешность не превысит величину 3σ , равна 0,997.

Закон распределения Стьюдента

Закон распределения Стьюдента описывает плотность распределения вероятности среднего арифметического, вычисленного по выборке из n случайных отчетов нормально распределенной генеральной совокупности. Наиболее часто этот закон применяется в процессе обработки результатов небольшого числа многократных наблюдений физической величины ($n < 20$). Его вид зависит от числа отчетов n , по которым находится среднее арифметическое значение, поэтому говорят о семействе законов распределения Стьюдента.

В центрированном и нормированном виде они описываются формулой

$$p(X) = \frac{\gamma[(f_{\Theta}+1)/2]}{\sqrt{f_{\Theta}\pi\gamma(f_{\Theta}/2)}} \left(1 + \frac{X^2}{f_{\Theta}}\right)^{\frac{-(f_{\Theta}+1)}{2}} = S(X, f_{\Theta}), \quad (4.12)$$

где f_{Θ} – число степеней свободы, зависящее от числа n усредняющих отсчетов: $f_{\Theta} = n-1$. При увеличении f_{Θ} распределение Стьюдента переходит в распределение Гаусса.

Для нормированных распределений Стьюдента с $f_{\Theta} > 4$ справедливо следующее соотношение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} = \sqrt{\frac{f_{\Theta}}{f_{\Theta}-2}}. \quad (4.13)$$

Распределения Стьюдента имеют ряд особенностей:

- при $n \leq 3$ их СКО становится равным бесконечности, то есть дисперсионная оценка ширины разброса не работает (перестает существовать);
- классический аппарат моментов для оценки формы и ширины распределения Стьюдента с малым числом степеней свободы оказывается не работоспособным, и их ширина и форма могут быть оценены лишь с использованием доверительных и энтропийных оценок. Этим распределение Стьюдента резко отличается от других распределений.

Необходимость прямых многократных измерений

Необходимость многократных измерений некоторой физической величины X_{II} возникает при наличии в процессе измерений значительных случайных погрешностей. В этом случае задача состоит в том, чтобы по результатам измерений найти наилучшую оценку истинного значения X_{II} и интервал, в котором находится сама величина X_{II} с заданной вероятностью. Решение задачи выполняется способом статистической обработки результатов измерений, основанным на гипотезе о распределении случайных погрешностей этих результатов по нормальному закону. Методика обработки результатов измерений используется применительно к прямым измерениям с многократными независимыми и равноточными наблюдениями.

Точность результата многократных наблюдений тем выше, чем меньше систематическая составляющая их погрешности. Поэтому весьма важно выявление систематических погрешностей и

исключение их из результатов наблюдений. К числу мер такого исключения относятся:

- устранение источников погрешностей до начала измерения;
- устранение (уменьшение) погрешностей в процессе измерения за счет использования соответствующих методов измерения.

Оценка результата измерения и его среднеквадратического отклонения

Для удобства анализа предположим, что при выполнении n многократных наблюдений одной и той же величины X_H (сопротивление резистора) постоянная систематическая погрешность Δ_c полностью исключена.

X_i	20,500	20,380	20,400	20,330	20,610	20,450	20,400	20,600	20,300	20,550
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Результат i -го наблюдения $X_i = X_H + \Delta_i$ находится с некоторой абсолютной случайной погрешностью $\Delta_i = \overset{\circ}{\Delta}_i = X_i - \overset{\circ}{X}_i$.

При нормальном законе распределения погрешности Δ_i за истинную величину $X_H = A$ принимают ее оптимальную оценку $\tilde{X} = \tilde{A}$ в виде среднего арифметического значения (оценки математического ожидания) выполненного ряда наблюдений, то есть считают, что $\tilde{X} = \tilde{A}$ есть результат измерения:

$$\tilde{X} = \tilde{A} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} = 20,452. \quad (4.14)$$

Зная оценку \tilde{X} истинного значения величины X_H , вычисляют абсолютную погрешность каждого из n наблюдений

$$\bar{\Delta}_i = X_i - \tilde{X}. \quad (4.15)$$

X_i	20,500	20,380	20,400	20,330	20,610	20,450	20,400	20,600	20,300	20,550
\tilde{X}	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452	20,452
$\bar{\Delta}_i$	0,048	-0,072	-0,052	-0,122	0,158	-0,002	-0,052	0,148	-0,152	0,098

Далее находится оценка среднеквадратического отклонения $\tilde{\sigma}$ наблюдений, характеризующая точность метода измерений:

$$\tilde{\sigma} \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\Delta}_i)^2} = 0,109219. \quad (4.16)$$

Оценка $\tilde{X} = \tilde{A}$ измеряемого истинного значения $X_H = A$ зависит от числа наблюдений n и является случайной величиной. В связи с

этим вводят и вычисляют оценку среднеквадратического отклонения (СКО) значения $\tilde{X} = \tilde{A}$, которая называется СКО результата измерения $\tilde{\sigma}_{cp} = S(\tilde{A})$. Данное СКО характеризует степень разброса значений $\tilde{X} = \tilde{A}$ по отношению к истинному значению и для различных n определяется по формуле

$$\tilde{\sigma}_{cp} = S(\tilde{A}) = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} = 0,034538. \quad (4.17)$$

Из выражений (4.16) и (4.17) следует, что точность метода и результата многократных наблюдений n увеличивается с ростом числа последних.

Исключение грубых погрешностей из результатов измерения

При измерении физической величины (сопротивление резистора) среди результатов наблюдений могут появиться одно-два, существенно отличающихся от остальных. При этом необходимо проверить, не являются ли они грубыми погрешностями (промахами), которые следует исключить из выполненной группы наблюдений. Для этого проводят следующие операции.

Результаты группы из n наблюдений упорядочивают по возрастанию $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$.

X_i	20,300	20,330	20,380	20,400	20,400	20,450	20,500	20,550	20,600	20,610
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

По приведенным выше формулам (4.14) и (4.16) вычисляются оценки среднего арифметического значения \tilde{X} и СКО наблюдений $\tilde{\sigma}$ данной выборки. Для предполагаемых промахов, которыми могут быть X_1 и X_{10} , рассчитываются коэффициенты:

$$t_1 = \frac{|X_1 - \tilde{X}|}{\tilde{\sigma}} = 1,391693; \quad t_{10} = \frac{|X_{10} - \tilde{X}|}{\tilde{\sigma}} = 1,446629. \quad (4.18)$$

Задаются уровнем значимости критерия ошибки q , то есть наибольшей вероятностью того, что используемый критерий может дать ошибочный результат. Следовательно, этот уровень должен быть достаточно малым, чтобы вероятность ошибки была невелика. Из таблицы 4.2 по заданным величинам q и n находят предельное (граничное) значение коэффициента:

$$t_e = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{\tilde{\sigma}}. \quad (4.19)$$

Таблица 4.2

Число наблюдений, n	Предельное значение t_e при уровне значимости q			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71

Для количества измерений $n = 10$ и $q = 0,100$ получается $t_e = 2,03$.

Далее выполняют сравнение коэффициентов с табличными значениями. Если $t_1 > t_e$ и $t_n > t_e$, то результаты X_1 и X_n относят к промахам и исключают из результатов наблюдений. В данном случае $t_1 < t_e$ и $t_{10} < t_e$. Следовательно, X_1 и X_{10} не относятся к промахам и не следует исключать их из результатов измерений.

Проверка гипотезы о нормальном распределении результатов измерения

Необходимость проверки гипотезы о нормальном законе распределения случайных погрешностей результатов наблюдений вызвана тем, что, исходя именно из нее, выполняется расчет параметров наблюдений. При числе результатов наблюдений $n \leq 15$ проверка на их принадлежность к нормальному распределению не производится. Если же $15 < n < 50$, то проверка выполняется по приведенному ниже критерию.

Находят смещенную оценку среднеквадратического отклонения наблюдений ($\tilde{\sigma}^*$) по формуле

$$\tilde{\sigma}^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2} = 0,090711. \quad (4.20)$$

По результатам наблюдений X_1, X_2, \dots, X_n вычисляют значение параметра

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \tilde{X}|}{n \tilde{\sigma}^*} = 0,829422.. \quad (4.21)$$

Далее выбирают уровень значимости критерия ошибки q_1 , равным 0,02 или 0,1. Из таблицы 4.3 по выбранному q_1 и известному числу наблюдений n находят предельные значения параметра \tilde{d} , называемые квантилями распределения:

$$d_{\min} = d_{\frac{1-q_1}{2}}; \quad d_{\max} = d_{\frac{q_1}{2}}. \quad (4.22)$$

Таблица 4.3

Число наблюдений n	$q_1 = 0,02$		$q_1 = 0,1$	
	d_{\min}	d_{\max}	d_{\min}	d_{\max}
16	0,6829	0,9137	0,7236	0,8884
21	0,6950	0,9001	0,7304	0,8768
26	0,7040	0,8901	0,7360	0,8686
31	0,7110	0,8826	0,7404	0,8625
36	0,7167	0,8769	0,7440	0,8578
41	0,7216	0,8722	0,7470	0,8540
46	0,726	0,8682	0,7496	0,8508
51	0,7291	0,8648	0,7518	0,8481

По $q_1 = 0,1$ и числу наблюдений $n = 21$ находим $d_{\min} = 0,7304$
 $d_{\max} = 0,8768$.

Гипотезу о нормальном распределении результатов наблюдений полагают верной при выполнении условия

$$d_{\min} < \tilde{d} \leq d_{\max}. \quad (4.23)$$

В данном примере условие (4.23) выполняется, следовательно, результаты распределены нормально.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения

Оценка $\tilde{X} = \tilde{A}$ измеряемой величины $X_H = A$ является случайной величиной, следовательно, отличается от нее на некоторую погрешность $\Delta = \overset{\circ}{\Delta}$. В связи с этим практический интерес представляет определение вероятности P_{Δ} того, что измеряемая

величина находится в заранее заданном интервале $(\tilde{A} - \Delta_\varepsilon, \tilde{A} + \Delta_\varepsilon)$. Данный интервал, по величине равный $2\Delta_\varepsilon$, называется доверительным интервалом, а вероятность P_D – доверительной вероятностью. Аналитически доверительная вероятность записывается в виде

$$P(\tilde{A} - \Delta_\varepsilon \leq A \leq \tilde{A} + \Delta_\varepsilon) = P_D. \quad (4.24)$$

Если число наблюдений n велико, то для расчета доверительной границы Δ_ε можно использовать нормальный закон распределения, а при $n < 20$ – распределение Стьюдента, учитывающее число n .

Поскольку в приведенном выше примере число наблюдений $n = 10$, то необходимо использовать распределение Стьюдента. Значение коэффициентов $t(P_D, n)$ этого распределения приведены в таблице 4.4, по заданной доверительной вероятности P_D и известному числу наблюдений n находят соответствующий коэффициент Стьюдента.

Таблица 4.4

Коэффициенты 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	2,013	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

Для $n = 10$ и $P_D = 0,95$, $t = 2,26$.

Далее определяют границу случайной погрешности результата измерения

$$\Delta_\varepsilon = \varepsilon = t(P_D, n)S(\tilde{A}) = 0,078056, \quad (4.25)$$

а также границы доверительного интервала:

$$\begin{aligned} A_H &= \tilde{A} - t(P_D, n)S(\tilde{A}) = 20,452 - 0,078056; \\ A_B &= \tilde{A} + t(P_D, n)S(\tilde{A}) = 20,452 + 0,078056. \end{aligned} \quad (4.26)$$

При одной и той же доверительной вероятности с уменьшением числа наблюдений доверительный интервал увеличивается, то есть точность измерений ухудшается.

Границы неисключенных остатков систематической погрешности результата измерения

Систематические погрешности измерений нельзя полностью исключить с помощью более точных приборов или методов измерений. Поэтому всегда остаются их неисключенные остатки – так называемые неисключенные систематические погрешности (НСП), определяемые с некоторой погрешностью.

Чаще всего НСП при повторных измерениях какой-либо физической величины с применением других приборов (аналогичного типа) изменяются, но остаются в заданных границах. Поэтому в настоящее время подобные НСП принято рассматривать как случайные с равномерным симметричным законом распределения плотности вероятности и определять каждую границами $\pm \theta_i$. Причем в качестве границы θ_i принимают, например, пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений.

θ_i	0,010	0,020	-0,010	0,040	0,000	-0,030	-0,020	0,000	-0,020	0,010
------------	-------	-------	--------	-------	-------	--------	--------	-------	--------	-------

Общую границу $\theta = \theta(P_d)$ нескольких неисключенных систематических погрешностей вычисляют по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}, \quad (4.27)$$

где m – это число неисключенных систематических погрешностей измерений; k – коэффициент, зависящий от m , принятой доверительной вероятности P_d и соотношения между составляющими θ_i . Данная вероятность должна быть равна той, которая была принята при расчете доверительной границы случайной погрешности результата измерения. На практике чаще всего задают доверительную вероятность $P_d = 0,95$ и реже $P_d = 0,99$. Значение $P_d = 0,99$ принимается при оценке погрешностей, связанных с весьма точными измерениями. При $P_d = 0,95$ коэффициент $k = 1,1$.

Для $m = 10$ и $k = 1,1$ $\theta = 0,06957$.



Прямые однократные измерения: методика точной оценки

Прямые однократные измерения относятся к наиболее распространенным. Методика обработки их результатов указана в рекомендации МИ 1552-86 «ГСОЕИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений». Применение данной методики возможно, если известны составляющие погрешности измерения, закон распределения случайных составляющих – нормальный, а неисключенных систематических погрешностей – равномерный с известными границами $\pm\theta$.

Результатом прямого однократного измерения физической величины $X_H = A$ является показание, снятое непосредственно с используемого средства измерения.

Погрешность результата измерения включает погрешность средства измерения, погрешность использованного метода измерения и субъективную (личную) погрешность оператора. Каждая из этих составляющих может иметь неисключенные систематические погрешности и случайные.

Пусть число неисключенных систематических погрешностей равно m и каждая задана границами $\pm\theta_i$ или доверительными границами $\pm\theta_i(P_j)$, то есть границами с известной доверительной вероятностью $P_j = P_{Dj}$. В этом случае доверительная граница систематической составляющей результата измерения $\theta = \theta(P_D)$ оценивается с задаваемой доверительной вероятностью P_D по одной из следующих формул:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}; \quad \theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2(P_j)}{k_j^2}}, \quad (4.28)$$

где k – коэффициент, зависящий от P_D и m ; k_j – коэффициент, зависящий от P_j .

Оценка доверительной границы случайной погрешности результата измерения $\varepsilon = \varepsilon(P_D)$ с задаваемой доверительной вероятностью $P = P_D$ выполняется в порядке, зависящем от вида представления случайных составляющих (погрешностей средства измерения, метода, оператора).

Если случайные составляющие погрешности измерений представлены своими среднеквадратическими отклонениями S_i ,

приведенными в технической документации, то $\varepsilon = \varepsilon(P_D)$ вычисляется по формуле

$$\varepsilon = z_{P/2} S(\tilde{A}) = z_{P/2} \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i^2}, \quad (4.29)$$

где m – число составляющих; $z_{P/2} = z$ – аргумент функции Лапласа $\Phi_l(z)$, соответствующий доверительной вероятности $\Phi_l(z) = P/2$; $S(\tilde{A})$ – среднее квадратическое отклонение результата однократного измерения величины A .

При $P = P_D = 0,95$ принимают $z_{P/2} = 2$, а при $P = P_D = 0,99$ принимают $z_{P/2} = 2,6$.

Если случайные составляющие представлены своими среднеквадратическими отклонениями S_i , которые были определены на основе эксперимента при числе измерений $n < 20$, то $\varepsilon = \varepsilon(P_D)$ вычисляется по формуле

$$\varepsilon = t(P_D, n) S(\tilde{A}) = t(P_D, n) \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i^2}, \quad (4.30)$$

где $t(P_D, n)$ – коэффициент Стьюдента, определяемый по заданным P_D и числу наблюдений n . Причем n должно быть равно минимальному числу измерений, которое выполнялось при поиске оценок среднеквадратического отклонения S_i .

В случаях, когда случайные составляющие погрешности измерений представлены доверительными границами $\varepsilon_i(P)$, соответствующими одинаковой доверительной вероятности $P = P_D$, то значение $\varepsilon = \varepsilon(P_D)$ следует рассчитывать по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2}. \quad (4.31)$$

Если случайные составляющие заданы доверительными границами $\varepsilon_i(P)$ с различной доверительной вероятностью $P_i = P_{Di}$, то $\varepsilon = \varepsilon(P_D)$ с задаваемой вероятностью P_D может быть найдена по выражению:

$$\varepsilon = z_{P/2} S(\tilde{A}) = z_{P/2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\varepsilon_i^2(P_i)}{z_{P/2}^2}}, \quad (4.32)$$

где $S(\tilde{A})$ – среднеквадратическое отклонение результата однократного измерения; $z_{P/2}$ и $z_{P/2}$ – относительные аргументы функции Лапласа $\Phi_l(z)$, определяемые при значениях $\Phi_l(z) = P_D/2$ и $\Phi_l(z) = P_{Di}/2$ соответственно.

Погрешность результата прямого однократного измерения $\Delta = \Delta(P_{\Delta})$ оценивается в зависимости от отношения $\theta / S(\tilde{A})$ по одной из формул, приведенных в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Значения $\theta / S(\tilde{A})$	Погрешности результата измерения Δ
$\theta / S(\tilde{A}) < 0,8$	$\Delta = \varepsilon(P_{\Delta})$
$\theta / S(\tilde{A}) > 8$	$\Delta = \varepsilon(P_{\Delta})$
$0,8 \leq \theta / S(\tilde{A}) \leq 8$	$\Delta = K[\varepsilon(P_{\Delta}) + \theta(P_{\Delta})]$

Значения коэффициента K при величинах доверительной вероятности $P_{\Delta} = 0,95$ или $P_{\Delta} = 0,99$ определяются по таблице 4.6.

Таблица 4.6

$\theta / S(\tilde{A})$	0,8	1	2	3	4	5	6	7	8
K при $P_{\Delta} = 0,95$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
K при $P_{\Delta} = 0,99$	0,84	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Результат прямого однократного измерения величины $X_H = A$ записывается в форме

$$X_H = \tilde{A} \pm \Delta(P_{\Delta}), \quad (4.33)$$

где \tilde{A} – результат измерения; P_{Δ} – доверительная вероятность погрешности результата прямого измерения Δ . Рекомендуется выбирать вероятность $P_{\Delta} = 0,95$.

Прямые однократные измерения: методика приближенной оценки

При такой оценке, как и при точной, необходимо перед началом измерений провести предварительную оценку составляющих погрешности результата и собственно погрешности измерения. Эта информация извлекается из опыта проведения подобных измерений, из нормативно-технической документации на используемые средства измерений, из научно-технических отчетов и других источников. Если оценка погрешности превышает допустимую, то следует выбрать более точное средство измерений или изменить методику измерения.

Допускается пренебрежение случайными погрешностями, если доказано, что граница θ неисключенных систематических погрешностей результата измерения больше среднеквадратического отклонения $S(\tilde{A})$ случайных погрешностей в восемь раз и более.

В простейшем случае погрешность результата измерения равна пределу основной погрешности средства измерения $\Delta_{\text{СИ}}$,

определенной по нормативно-технической документации, если измерения проводились в нормальных условиях. При этом результат измерения можно записать в виде $X_H = \tilde{A} \pm \Delta_{\text{Си}}$, то есть без указания доверительной вероятности, которая подразумевается равной 0,95. Если же измерения проводились в условиях, отличающихся от нормальных, то следует определять и учитывать пределы дополнительных погрешностей, а затем суммировать их с основными. Порядок такого суммирования приведен в нормативных метрологических документах.

Косвенные измерения: оценка результата и погрешностей измерений

Особенность косвенных измерений состоит в том, что величина A , значение которой надо измерить, является известной функцией f ряда других величин – аргументов X_1, X_2, \dots, X_m . Данные аргументы подвергаются прямым измерениям, а величина A вычисляется по формуле

$$A = f(X_1, X_2, \dots, X_m). \quad (4.34)$$

Каждый аргумент в выражении (4.34) измеряется с некоторой погрешностью. Поэтому любой из них можно представить в следующем виде:

$$X_i = \tilde{X}_i + \Delta_i = \tilde{X} + (\Delta_{Ci} + \overset{\circ}{\Delta}_i), \quad (4.35)$$

где $X_i, \tilde{X}_i, \Delta_i$ – соответственно истинное значение, оценка и абсолютная погрешность результата измерения i -го аргумента, а параметры $\Delta_{Ci}, \overset{\circ}{\Delta}_i$ – систематическая и случайная составляющие погрешности Δ_i .

Задача состоит в том, чтобы с помощью функции (4.34) и ее аргументов найти оценку результата \tilde{A} и его погрешности $\Delta(\tilde{A})$ в виде, подобном (4.35):

$$A = \tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) = \tilde{A} + [\Delta_C(\tilde{A}) + \overset{\circ}{\Delta}(\tilde{A})], \quad (4.36)$$

где $\Delta_C(\tilde{A}), \overset{\circ}{\Delta}(\tilde{A})$ – систематическая и случайная составляющие погрешности $\Delta(\tilde{A})$. Для решения задачи подставим аргументы (4.35) в (4.34), что приводит к выражению:

$$\tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) = f(\tilde{X}_1 + \Delta_1, \tilde{X}_2 + \Delta_2, \dots, \tilde{X}_m + \Delta_m) \quad (4.37)$$

Положим, что в этой формуле погрешности Δ_i аргументов малы по сравнению с оценкой \tilde{X}_i аргументов и что в пределах изменения Δ_i допустима линеаризация функции (4.37). Учитывая это, разложим данную функцию в ряд Тейлора и оставим в нем только члены первого порядка:

$$\begin{aligned} A &= \tilde{A} + \Delta(\tilde{A}) = \tilde{A} + \left[\Delta_C(\tilde{A}) + \overset{\circ}{\Delta}(\tilde{A}) \right] = \\ &= f(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m) + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \Delta_i + R \approx \\ &\approx f(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m) + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\Delta_i + \overset{\circ}{\Delta}_i \right), \end{aligned} \quad (4.38)$$

где $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ – частные производные, вычисляемые при оценках \tilde{X}_i ; R – остаточный член ряда Тейлора:

$$R = 0,5 \sum_{i,j=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} (\Delta_i \Delta_j) \quad (4.39)$$

Из (4.38) получаем формулу для оценки результата косвенного измерения:

$$\tilde{A} \approx f(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m) \quad (4.40)$$

а также выражение для оценки абсолютной систематической погрешности

$$\Delta_C(\tilde{A}) \approx \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \Delta_{Ci}, \quad (4.41)$$

в котором частные производные $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ – называются коэффициентами влияния i -го аргумента, а слагаемые $\frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_i$ – частными погрешностями.

На практике систематические погрешности Δ_i аргументов стремятся устранить, а неисключенные остатки таких погрешностей рассматривают как случайные, подчиняющиеся равномерному закону распределения. Поэтому выражение для оценки систематической погрешности косвенного измерения, приведенное далее, отличается от соотношения (4.41).

Для оценки случайной составляющей погрешности косвенного измерения $\overset{\circ}{\Delta}(\tilde{A})$ вычитают (4.40) и (4.41) из (4.36). В оставшемся выражении

$$\overset{\circ}{\Delta}(\tilde{A}) \approx \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \overset{\circ}{\Delta}_i \quad (4.42)$$

усредняют квадраты левой и правой части, что позволяет в итоге найти оценку среднеквадратического отклонения $S(\tilde{A})$ случайной погрешности результата косвенного измерения в зависимости от оценок среднеквадратического отклонения $\tilde{\sigma}_i$, случайных погрешностей аргументов:

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \tilde{\sigma}_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \tilde{\sigma}_i^2 \tilde{\sigma}_j^2 \tilde{r}_{ij}}, \quad (4.43)$$

где \tilde{r}_{ij} – оценка коэффициента корреляции, определяющего меру статистической связи случайных величин X_i и X_j . Все возможные значения оценки коэффициента корреляции \tilde{r}_{ij} лежат в интервале от -1 до +1. Установление значения \tilde{r}_{ij} обычно затруднительно. Поэтому рассматривают два случая: $\tilde{r}_{ij} = 1$ (полная статистическая связь) и $\tilde{r}_{ij} = 0$ (отсутствие таковой).

При $\tilde{r}_{ij} = 0$ оценку среднеквадратического отклонения $S(\tilde{A})$ вычисляют по формуле

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \tilde{\sigma}_i^2}. \quad (4.44)$$

Для использования выражений (4.43) и (4.44) требуется вычисление оценок среднеквадратического отклонения $\tilde{\sigma}_i$ аргументов функции (4.34) на основе обработки результатов их многократных наблюдений.

Рассмотрим частные случаи вычисления среднеквадратического отклонения $S(\tilde{A})$ косвенного измерения при отсутствии корреляции между погрешностями измерения аргументов.

Пусть функция (4.34) имеет вид суммы:

$$A = \sum_{i=1}^m a_i X_i. \quad (4.45)$$

Найдя ее частные производные $\frac{\partial f}{\partial X_i} = a_i$ и подставив их в (4.44),

получено:

$$S(\tilde{A}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m a_i^2 \tilde{\sigma}_i^2}. \quad (4.46)$$

Предположим, что функция (4.20) имеет вид произведения:

$$A = k \cdot X_1^\alpha \cdot X_2^\beta \cdot \dots \cdot X_m^\gamma, \quad (4.47)$$

где $k, \alpha, \beta, \dots, \gamma$ – константы.

Определяем ее частные производные по X_1, X_2, \dots, X_m и подставляем их в (4.44). После простых преобразований получаем удобное для расчетов выражение:

$$\delta(\tilde{A}) = \frac{S(\tilde{A})}{\tilde{A}} = \sqrt{(\alpha\delta_1)^2 + (\beta\delta_2)^2 + \dots + (\gamma\delta_m)^2}, \quad (4.48)$$

где $\delta(\tilde{A})$ и $\delta_i = \frac{\sigma_i}{\tilde{X}_i}$ – относительные среднеквадратические отклонения случайных погрешностей результата измерения \tilde{A} и i -го аргумента.

**Косвенные измерения: доверительные
границы случайной погрешности
и неисключенных систематических
погрешностей**

При косвенных измерениях, как и при рассмотренных ранее многократных наблюдениях прямых измерений, оценка результата измерения \tilde{A} (4.40) является случайной величиной и отличается от истинного значения, которое обозначим через A_H . Поэтому практический интерес имеет оценка доверительного интервала $(\tilde{A}-\Delta_r, \tilde{A}+\Delta_r)$, в котором находится A_H с заданной доверительной вероятностью P_D , где $\pm\Delta_r$ – доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения.

При условии распределения плотности вероятности погрешностей результатов измерения всех аргументов функции $A = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ по нормальному закону граница Δ_r вычисляется по формуле

$$\Delta_r = \varepsilon = t(P_D, n)S(\tilde{A}), \quad (4.49)$$

где $t(P_D, n)$ – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P_D и некоторому $n = f_3 + 1$; $S(\tilde{A})$ – оценка среднеквадратического отклонения случайной погрешности косвенного измерения (4.44).

Коэффициент f_3 – эффективное число степеней свободы распределения Стьюдента – рекомендуется рассчитывать по приближенной формуле

$$f_3 = \left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 \tilde{\sigma}_i^4}{n_i + 1} \right)^{-1} \left[\left(\sum_{i=1}^m b_i^2 \tilde{\sigma}_i^2 \right)^2 - 2 \left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 \tilde{\sigma}_i^4}{n_i + 1} \right) \right], \quad (4.50)$$

где $\frac{\partial f}{\partial X_i} = b_i$; n_i – число измерений при определении аргумента X_i .

Граница θ неисключенных систематических погрешностей результата косвенного измерения вычисляется без учета знака по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \theta_i^2}. \quad (4.51)$$

Здесь θ_i – заданные границы результатов измерений неисключенных систематических погрешностей аргументов; k – поправочный коэффициент, значение которого вычисляется с учетом задаваемой доверительной вероятности P_D для оценки значений θ , а также числа m составляющих θ_i . Погрешность расчета границы θ по формуле (4.51) не превышает 5%.

Косвенные измерения: границы погрешности результата измерения

Суммарные границы $\pm \Delta$ погрешности результата косвенного измерения вычисляют с учетом границы неисключенных систематических погрешностей θ (см. формулу (4.51)) и доверительной границы ε случайной погрешности (4.49) в зависимости от отношения $\theta/S(\tilde{A})$, где $S(\tilde{A})$ – оценка среднеквадратического отклонения случайной погрешности косвенного измерения. Порядок такого учета аналогичен соответствующему учету для однократных прямых измерений и указан в таблице 4.5, где коэффициент K зависит от задаваемой доверительной вероятности ($P_D = 0,95$ или $P_D = 0,99$) и отношения $\theta/S(\tilde{A})$. Значения данного коэффициента при косвенных измерениях выбираются по таблице 4.7.

Таблица 4.7

$\theta/S(\tilde{A})$	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8
K для $P_D = 0,95$	0,81	0,77	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,81
K для $P_D = 0,99$	0,87	0,85	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Результат косвенного измерения и его погрешность должны представляться в виде формулы

$$X_{II} = \tilde{A} \pm \Delta(P_D). \quad (4.52)$$

В заключение отметим, что при однократных измерениях аргументов процедура определения результата косвенно измеряемой величины сохраняется такой же, как и при многократных измерениях.

Правила округления результатов измерений

В окончательной записи погрешность измерения принято выражать числом с одним или двумя значащими цифрами. Установлены следующие правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного результата измерения [4].

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной – если первая цифра 3 или более.
2. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.
3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.
4. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу.
5. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру числа не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.
6. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

ГЛАВА 5

СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

5.1. Термины и определения

Средства измерительной техники – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений.

➤ К средствам измерительной техники относят средства измерений и их совокупности (измерительные системы, измерительные установки), измерительные принадлежности, измерительные устройства.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

➤ 1. Приведенное определение вскрывает суть средства измерений, заключающуюся, во-первых, в «умении» хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, в неизменности размера хранимой единицы. Эти важнейшие факторы и обуславливают возможность выполнения измерения (сопоставление с единицей), то есть «делают» техническое средство средством измерений. Если размер единицы в процессе измерений изменяется более, чем установлено нормами, таким средством нельзя получить результат с требуемой точностью. Это означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое

Глава 5. Средства измерительной техники

средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

2. При оценивании величин по условным шкалам шкалы выступают как бы средством измерений этих величин.

Рабочее средство измерений – средство измерений, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений.

Основное средство измерений – средство измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей.

Вспомогательное средство измерений – средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учитывать для получения результатов измерений требуемой точности.

➤ Термометр для измерения температуры газа в процессе измерений объемного расхода этого газа.

Стандартизованное средство измерений – средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта.

➤ Обычно стандартизованные средства измерений подвергают испытаниям и вносят в Госреестр.

Нестандартизованное средство измерений – средство измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной.

Автоматическое средство измерений – средство измерений, производящее без непосредственного участия человека измерения и все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала.

➤ Автоматическое средство измерений, встроенное в автоматическую технологическую линию, нередко называют *измерительный автомат* или *контрольный автомат*. Применяют также понятие *измерительные работы*, под которыми нередко понимают разновидность *контрольно-измерительных машин*, отличающихся хорошими манипуляционными свойствами, высокими скоростями перемещений и измерений.

Автоматизированное средство измерений – средство измерений, производящее в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций.

- Барограф (измерение и регистрация результатов); электрический счетчик электроэнергии (измерение данных нарастающим итогом).

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

- 1. Различают следующие разновидности мер:

однозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря 1 кг);

многозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);

набор мер – комплект мер одного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);

магазин мер – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

2. При оценивании величин по условным (неметрическим) шкалам, имеющим реперные точки, в качестве «меры» нередко выступают вещества или материалы с приписанными им условными значениями величин. Так, для шкалы Мооса мерами твердости являются минералы различной твердости. Приписанные им значения твердости образуют ряд реперных точек условной шкалы.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

➤ 1. По способу индикации значений измеряемой величины измерительные приборы разделяют на *показывающие* и *регистрирующие*.

2. По действию измерительные приборы разделяют на *интегрирующие* и *суммирующие*. Различают также *приборы прямого действия* и *приборы сравнения*, *аналоговые* и *цифровые приборы*, *самопишущие* и *печатывающие приборы*.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

➤ 1. Измерительную установку, применяемую для поверки, называют *проверочной установкой*. Измерительную установку, входящую в состав эталона, называют *эталонной установкой*.

2. Некоторые большие измерительные установки называют *измерительными машинами*.

Установка для измерений удельного сопротивления электротехнических материалов; установка для испытаний магнитных материалов.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

➤ 1. В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы и др.

2. Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют *гбкой измерительной системой*.

Измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде физических величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов. Радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга.

Измерительно-вычислительный комплекс – функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

➤ 1. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

2. По характеру преобразования различают *аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые преобразователи*. По месту в измерительной цепи различают *первичные и промежуточные преобразователи*. Выделяют также *масштабные и передающие преобразователи*.

Термопара в термоэлектрическом термометре; измерительный трансформатор тока; электропневматический преобразователь.

Первичный измерительный преобразователь – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, то есть первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы).

➤ В одном средстве измерения может быть несколько первичных преобразователей.

Термопара в цепи электрического термометра; ряд первичных преобразователей измерительной контролирующей системы, расположенных в разных точках контролируемой среды.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы.

➤ 1. Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы.

2. В области измерений ионизирующих излучений применяют термин *детектор*.

Датчики запущенного метеорологического радиозонда передают измерительную информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы.

Средство сравнения – техническое средство или специально создаваемая среда, посредством которых возможно выполнять сравнения друг с другом мер однородных величин или показания измерительных приборов.

➤ Иногда техническое средство снабжается средством измерений, обеспечивающим функцию сравнения.

Рычажные весы, на одну чашку которых устанавливается эталонная гиря, а на другую поверяемая, – есть средство их сравнения. Температурное поле, создаваемое термостатом для сравнения показаний термометров, является необходимой средой. Давление среды, создаваемое компрессором, может быть измерено поверяемым и эталонным манометрами одновременно. На основании показаний эталонного прибора градуируется поверяемый прибор.

Компаратор – средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин.

➤ Рычажные весы; компаратор для сличения нормальных элементов.

Измерительная цепь – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода.

➤ Измерительную цепь измерительной системы называют *измерительным каналом*.

Измерительное устройство – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение.

➤ Измерительным устройством может быть названо регистрирующее устройство измерительного прибора (включающее ленту для записи, лентопротяжный механизм и пишущий элемент), измерительный преобразователь.

Индикатор – техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или превышения уровня ее порогового значения.

➤ Индикатором наличия (или отсутствия) измерительного сигнала может служить осциллограф. Индикатор близости к нулю сигнала называют нулевым или нуль-индикатором. При химических реакциях в качестве индикаторов применяют лакмусовую бумагу и какие-либо вещества. В области измерений ионизирующих излучений индикатор часто дает световой и (или) звуковой сигнал о превышении уровнем радиации его порогового значения.

Чувствительный элемент средства измерений – часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входной измерительный сигнал.

Измерительный механизм средства измерений – совокупность элементов средства измерений, которые обеспечивают необходимое перемещение указателя (стрелки, светового пятна и т.д.).

➤ Измерительный механизм милливольтметра состоит из постоянного магнита и подвижной рамки.

Показывающее устройство средства измерений – совокупность элементов средства измерений, которые обеспечивают визуальное восприятие значений измеряемой величины или связанных с ней величин.

Указатель средства измерений – часть показывающего устройства, положение которой относительно отметок шкалы определяет показание средства измерений.

- 1. У барометра-анероида указателем является подвижная стрелка.
- 2. У ртутного термометра – поверхность столбика жидкости.

Регистрирующее устройство средства измерений – совокупность элементов средства измерений, которые регистрируют значение измеряемой или связанной с ней величины.

Шкала средства измерений – часть показывающего устройства средства измерений, представляющая собой упорядоченный ряд отметок вместе со связанный с ними нумерацией.

➤ Отметки на шкалах могут быть нанесены равномерно или неравномерно. В связи с этим шкалы называют *равномерными* или *неравномерными*.

Отметка шкалы – знак на шкале средства измерений (черточка, зубец, точка и др.), соответствующий некоторому значению физической величины.

Числовая отметка шкалы – отметка шкалы средства измерений, у которой проставлено число.

Деление шкалы – промежуток между двумя соседними отметками шкалы средства измерений.

Цена деления шкалы – разность значения величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Длина шкалы – длина линии, проходящей через центры всех самых коротких отметок шкалы средства измерений и ограниченной начальной и конечной отметками.

- 1. Линия может быть реальной или воображаемой, кривой или прямой.
- 2. Длина шкалы выражается в единицах длины независимо от единиц, указанных на шкале.

Начальное значение шкалы – наименьшее значение измеряемой величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений.

- Для медицинского термометра начальным значением шкалы является 34,3 °C.

Конечное значение шкалы – наибольшее значение измеряемой величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений.

- Для медицинского термометра конечным значением шкалы является 42 °C.

Табло цифрового измерительного прибора – показывающее устройство цифрового измерительного прибора.

5.2. Основные вопросы для изучения темы

Каковы функции, реализуемые средствами измерений?

Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, и реализует одну из двух функций:

- Воспроизведение величины заданного (известного) размера. Например, гиря – заданная масса; магазин сопротивлений – ряд дискретных значений сопротивления.
- Выработка сигнала (показания), несущего информацию о значении измеряемой величины.

Показания средства измерения или непосредственно воспринимаются органами чувств человека (показания стрелочных приборов), или они недоступны восприятию человеком и используются для преобразования другими средствами измерений.

Каким образом классифицируют средства измерений?

Существует несколько классификационных признаков, что объясняется многообразием средств измерений и их использованием в различных областях науки и техники [4].

1. По роли в системе обеспечения единства измерений средства измерений делятся на:

- метрологические, предназначенные для воспроизведения единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим средствам измерений;
- рабочие, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Подавляющее большинство используемых на практике средств измерений принадлежит ко второй группе. Метрологические средства измерений весьма немногочисленны. Они разрабатываются, производятся и эксплуатируются в специализированных научно-исследовательских центрах.

2. По уровню автоматизации все средства измерений делятся на три группы:

- неавтоматические;
- автоматизированные, производящие в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;

- автоматические, производящие в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей данных или выработкой управляющих сигналов.

В настоящее время все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства измерений, что связано с широким использованием в них электронной и микропроцессорной техники.

3. По уровню стандартизации средства измерений подразделяются на:

- стандартизованные, изготовленные в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта;
- нестандартизованные (уникальные), предназначенные для решения специальной измерительной задачи.

В основном средства измерений являются стандартизованными. Они серийно выпускаются промышленными предприятиями и в обязательном порядке подвергаются государственным испытаниям. Не стандартизованные средства измерений разрабатываются специализированными научно-исследовательскими организациями и выпускаются единичными экземплярами. Они не проходят государственных испытаний, их характеристики определяются при метрологической аттестации.

4. По отношению к измеряемой физической величине средства измерений делятся на:

- основные – средства измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;
- вспомогательные – средства измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

Элементарные средства измерений и их функции

Элементарные средства измерений предназначены для реализации отдельных операций прямого измерения. К ним относятся меры, устройства сравнения и измерительные преобразователи (рис. 5.1). Каждое из них, взятое по отдельности, не может осуществить операцию измерения [4].

Операцию воспроизведения величины заданного размера, выполняемую *мерой*, можно формально представить как преобразование цифрового кода N в заданную физическую величину X_m . Поэтому

Глава 5. Средства измерительной техники

уравнение преобразования меры запишется в виде $X_m = N[Q]$, где $[Q]$ – единица данной физической величины.

Выходом меры является квантованная аналоговая величина X_m заданного размера, а входом следует считать числовое значение величины N (рис. 5.2).



Рис. 5.1. Элементарные средства измерений

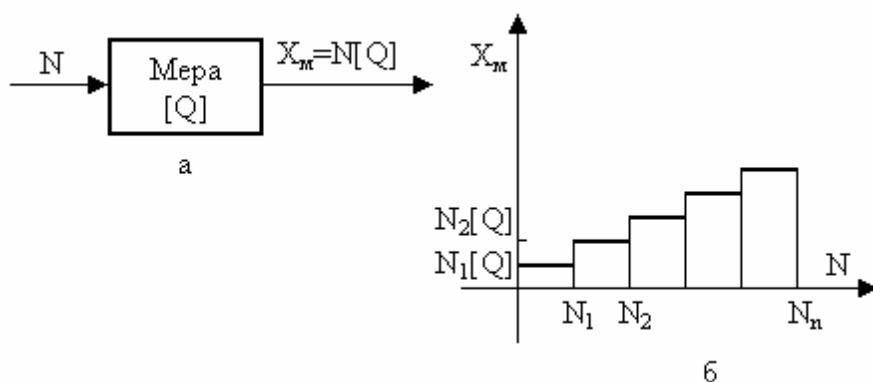


Рис. 5.2. Обозначение меры в структурных схемах (а) и функция преобразования многозначной меры (б)

Степень совершенства меры определяется постоянством размера каждой ступени квантования $[Q]$ и степенью многозначности, то есть числом N воспроизводимых известных значений ее выходной величины. С наиболее высокой точностью посредством мер воспроизводятся основные физические величины: длина, масса, частота, напряжение и ток.

Устройство сравнения (компаратор) – средство измерений, дающее возможность сравнивать друг с другом меры однородных величин или же показания измерительных приборов. Примерами могут служить: рычажные весы, на одну чашку которых устанавливается образцовая гиря, а на другую – поверяемая; градуировочная жидкость для сличения показаний образцового и рабочего ареометров; тепловое поле, создаваемое термостатом для сравнения показаний термометров.

Во многих относительно простых средствах измерений роль компаратора выполняют органы чувств человека, главным образом зрение, например, при сравнении отклонения указателя прибора и числа делений, нанесенных на его шкале.

В электронных компараторах сравнение реализуется путем последовательного соединения вычитающего устройства (*ВУ*), формирующего разность входных сигналов ($X_1 - X_2$), и усилителя переменного напряжения с большим коэффициентом усиления (усилителя-ограничителя *УО*), выполняющего функции индикатора знака разности (рис. 5.3). Выходной сигнал *УО* равен его положительному напряжению питания (принимаемому за логическую единицу), если разность $(X_1 - X_2) > 0$, и отрицательному напряжению питания (принимаемому за логический нуль), если $(X_1 - X_2) < 0$.

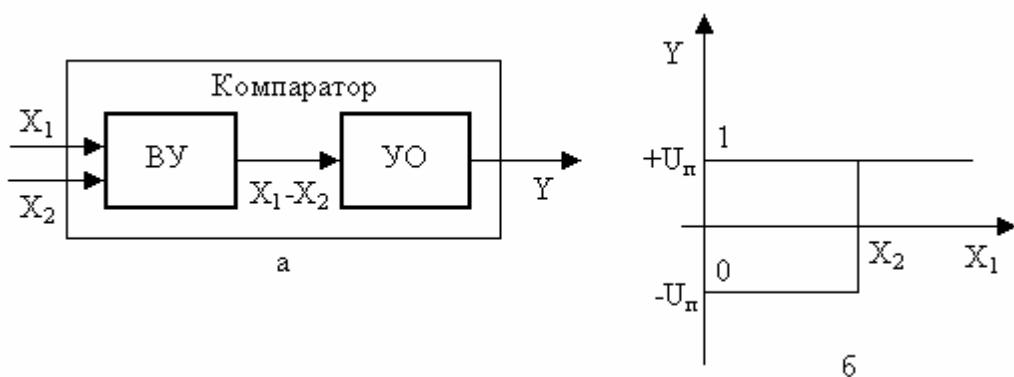


Рис. 5.3. Структурная схема компаратора (а) и его функция преобразования (б)

Функция преобразования идеального компаратора, показанного на рис.5.3, б, описывается уравнением:

$$Y = [0,5 + 0,5 \cdot \text{sign}(X_1 - X_2)] = \begin{cases} +U_{\text{п}} \div 1 & \text{при } X_1 > X_2; \\ -U_{\text{п}} \div 0 & \text{при } X_1 < X_2. \end{cases} \quad (5.1)$$

Измерительный преобразователь (ИП) предназначен для выполнения одного измерительного преобразования. Его работа протекает в условиях, когда помимо основного сигнала X , связанного с измеряемой величиной, на него воздействуют множество других сигналов Z_i , рассматриваемых в данном случае как помехи (рис.5.4, а).

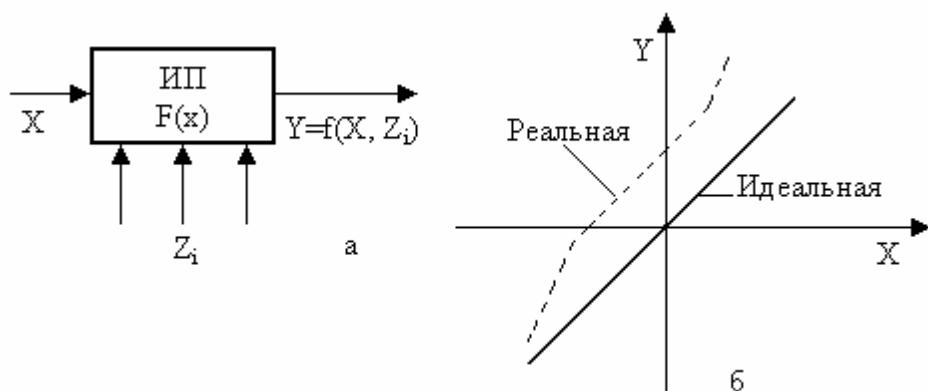


Рис. 5.4. Структурная схема измерительного преобразователя (а) и его функция преобразования (б)

Важнейшей характеристикой измерительного преобразователя является функция преобразования (рис.5.4, б), которая описывает статические свойства преобразователя и в общем случае записывается в виде $Y = F(X, Z_i)$. Функция идеального измерительного преобразователя при отсутствии помех описывается уравнением $Y = kX$. Она линейна, безынерционна, стабильна и проходит через начало координат. Реальная передаточная функция в статическом режиме имеет вид $Y = k(1+\gamma)X + \Delta_0 + \Delta[F(X)]$ и может отличаться от идеальной смещением нуля Δ_0 , наклоном γ и нелинейной составляющей $\Delta[F(X)]$.

?

Какие существуют типы измерительных преобразователей?

Измерительные преобразователи классифицируются по ряду признаков [4].

1. **По местоположению в измерительной цепи** преобразователи делятся на:
 - первичные, на которые непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, то есть они являются первыми в измерительной цепи средствами измерений;
 - промежуточные, которые располагаются в измерительной цепи после первичного.
2. **По характеру преобразования входной величины** измерительные преобразователи делятся на две группы:
 - Линейные, имеющие линейную связь между входной и выходной величинами.

Их важной разновидностью является *масштабный* измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины или измерительного сигнала в заданное число раз. Его уравнение преобразования имеет вид $Y = kX$, где X , Y – однородные входная и выходная величины; k – постоянный коэффициент передачи. Примерами масштабных преобразователей могут служить усилители, делители напряжения, измерительные трансформаторы напряжения.

- Нелинейные, у которых связь между входной и выходными величинами нелинейная.
3. **По виду входных и выходных величин** измерительные преобразователи делятся на:
 - аналоговые, преобразующие одну аналоговую величину в другую аналоговую величину;
 - аналого-цифровые (АЦП), предназначенные для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код;
 - цифроаналоговые (ЦАП), предназначенные для преобразования цифрового кода в аналоговую величину.

АЦП и ЦАП: обозначения, передаточные функции, уравнения преобразования

Обозначения в структурных схемах и передаточные функции АЦП и ЦАП показаны на рис. 5.5. В качестве входных (для ЦАП) и выходных (для АЦП) кодов, как правило, используются параллельные двоичные коды. Входной (для АЦП) и выходной (для ЦАП) величиной чаще всего является напряжение U .

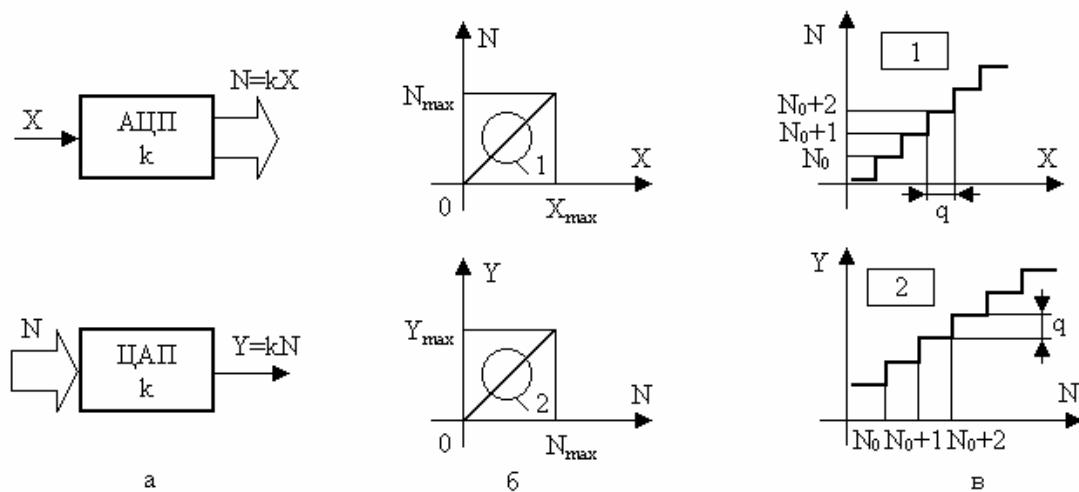


Рис. 5.5. Обозначения в структурных схемах (а), передаточные функции (б) и части передаточных функций (в) АЦП, ЦАП в увеличенном масштабе

Уравнение преобразования идеального однополярного ЦАП:

$$U = \frac{U_m}{2^R - 1} N_{10} = \frac{U_m}{2^R - 1} (a_{R-1} \cdot 2^{R-1} + a_{R-2} \cdot 2^{R-2} \dots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0), \quad (5.2)$$

где R – разрядность ЦАП; U_m – максимальное выходное напряжение ЦАП; N_{10} – значение входного кода в десятичной системе счисления; a_i – коэффициенты, которые могут принимать значения, равные нулю или единице.

Из уравнения видно, что квант напряжения на выходе ЦАП, называемый единицей младшего разряда, равен $U_m/(2^R - 1)$.

Уравнение преобразования идеального однополярного АЦП записывается в виде

$$N_{10} = \text{int} \left[\frac{U}{U_m} (2^R - 1) \right], \quad (5.3)$$

где $\text{int}[X]$ – функция, выделяющая целую часть числа X . Минимальное изменение напряжения на входе АЦП, которое приводит к изменению выходного кода, называемое разрешающей способностью, равно $U_m/(2^R - 1)$.

Структурная схема измерительного прибора: общий вид и описание

Обобщенная структурная схема измерительного прибора показана на рис. 5.6. Измеряемая физическая величина воздействует на устройство преобразования, состоящее из первичного измерительного преобразователя и совокупности элементарных средств измерений. Первичный преобразователь преобразует измеряемую физическую величину в другую величину, однородную или неоднородную с ней. Сигнал с выхода преобразователя проходит через совокупность элементарных средств измерений. В простейших измерительных приборах такая совокупность может отсутствовать. Например, в аналоговых вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется в угол поворота стрелки с помощью первичного электромеханического измерительного преобразователя.



Рис. 5.6. Обобщенная структурная схема измерительного прибора

На выходе устройства преобразования формируется сигнал, параметры которого соответствуют входным характеристикам отсчетного устройства.

Отсчетное устройство – это элемент средства измерения, преобразующий измерительный сигнал в форму, доступную восприятию органами чувств человека. По форме представления показаний отсчетные устройства делятся на аналоговые и цифровые.

По каким признакам классифицируются измерительные приборы?

Для учета всех особенностей многообразных измерительных приборов применяют классификацию по различным признакам.

1. По форме индикации измеряемой величины различают измерительные приборы:
 - показывающие, которые допускают только отсчитывание

- показаний измеряемой величины (стрелочный или цифровой вольтметр);
- регистрирующие, предусматривающие регистрацию показаний на том или ином носителе информации. Регистрация производится в аналоговой или цифровой форме.
2. **По методу преобразования измеряемой величины** существуют приборы:
- прямого преобразования;
 - компенсационного (уравновешивающего) преобразования;
 - смешанного преобразования.
3. **По назначению** измерительные приборы делятся на:
- амперметры;
 - вольтметры;
 - омметры;
 - термометры;
 - гигрометры и т.д.
4. **По форме преобразования используемых измерительных сигналов** существуют:
- аналоговые приборы, показания или выходной сигнал которых является непрерывной функцией изменения измеряемой величины;
 - цифровые приборы, принцип действия которых основан на квантовании измеряемой или пропорциональной ей величины.

Структурная схема прямого преобразования средства измерения

У средства измерения, имеющего **схему прямого преобразования**, все преобразования измерительного сигнала производятся в прямом направлении. Схема состоит из n последовательно соединенных блоков (рис. 5.7).

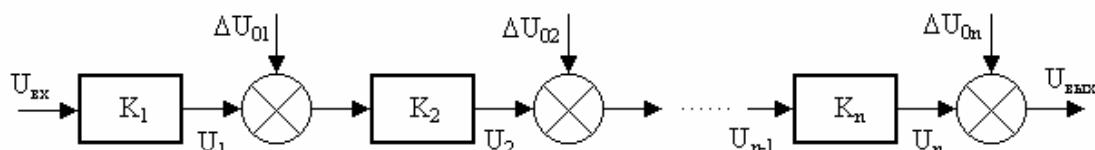


Рис. 5.7. Структурная схема прямого преобразования

На схеме через K_1, K_2, \dots, K_n обозначены коэффициенты преобразования блоков. Каждый i -й коэффициент определяется по формуле

$$K = \frac{dU_i}{dU_{i-1}}, \quad (5.4)$$

где U_{i-1} и U_i – входной и выходной сигналы i -го блока.

Входной сигнал $U_{\text{вх}}$, несущий информацию об измеряемой величине, последовательно преобразуется в промежуточные сигналы U_1, U_2, \dots, U_{n-1} и в выходной сигнал $U_{\text{вых}}$. В общем случае каждый из них является переменным во времени и может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих. Чаще всего информативным параметром сигнала является его амплитуда. В этом случае коэффициенты преобразования выражаются вещественными числами.

Первоначально считая, что все помехи ΔU_{0i} равны нулю и коэффициенты преобразования не зависят от уровня сигнала ($K_i = \text{const}$), получим уравнение преобразования средства измерения, имеющего структурную схему прямого преобразования:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{dU_{\text{вх}}}{dU_1} \frac{dU_1}{dU_2} \frac{dU_2}{dU_3} \dots \frac{dU_n}{dU_{n-1}} = U_{\text{вх}} \prod_{i=1}^n K_i = U_{\text{вх}} K, \quad (5.5)$$

где K – коэффициент преобразования средства измерения.

На процесс измерения будут оказывать влияние изменения и нестабильность коэффициентов преобразования ΔK_i , а также дрейфы нуля, помехи и наводки, которые в сумме можно описать сигналами ΔU_{0i} , складываемыми с выходными сигналами каждого блока. Абсолютная погрешность $\Delta U_{\text{вых}}$ измерения выходной величины, обусловленная нестабильностью коэффициента преобразования, может быть рассчитана как погрешность косвенного измерения с учетом выражения (5.5):

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} [K_2 K_3 \dots K_n \Delta K_1 + K_1 K_3 \dots K_n \Delta K_2 + \dots + K_1 K_2 \dots K_{n-1} \Delta K_n]. \quad (5.6)$$

Как видно из этого уравнения, погрешность $\Delta U_{\text{вых}}$ является мультипликативной, то есть зависит от уровня измеряемого сигнала. Относительная мультипликативная погрешность складывается из относительных погрешностей структурных элементов:

$$\delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{\Delta K}{K}, \quad (5.7)$$

где $\delta_i = \Delta K_i / K$ – относительная нестабильность коэффициента преобразования i -го блока; $\Delta K / K$ – относительная нестабильность коэффициента преобразования средства измерения.

Дрейф нуля, то есть изменение сигнала на выходе блока, не связанное с изменением входного сигнала, приводит к смещению передаточной функции i -го элемента. Он обычно определяется при входном сигнале, равном нулю. Результирующее действие сигналов

ΔU_{0i} приводит к появлению дополнительного выходного сигнала:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{01} K_2 K_3 \dots K_n + \Delta U_{02} K_3 K_4 \dots K_n + \dots + \Delta U_{0n} . \quad (5.8)$$

Таким образом, в средстве измерения, имеющем структурную схему прямого преобразования, происходит суммирование погрешностей, вносимых отдельными блоками. Для достижения высокой точности прибора требуется высокая стабильность параметров и характеристик каждого из блоков.

Схема уравновешивающего преобразования средства измерения

Особенность **уравновешивающего (компенсационного) преобразования** состоит в том, что выходная величина средства измерений $U_{\text{вых}}$ подвергается обратному преобразованию в величину U'_m , однородную с входной величиной ΔU . Следовательно, используется отрицательная обратная связь (рис. 5.8).

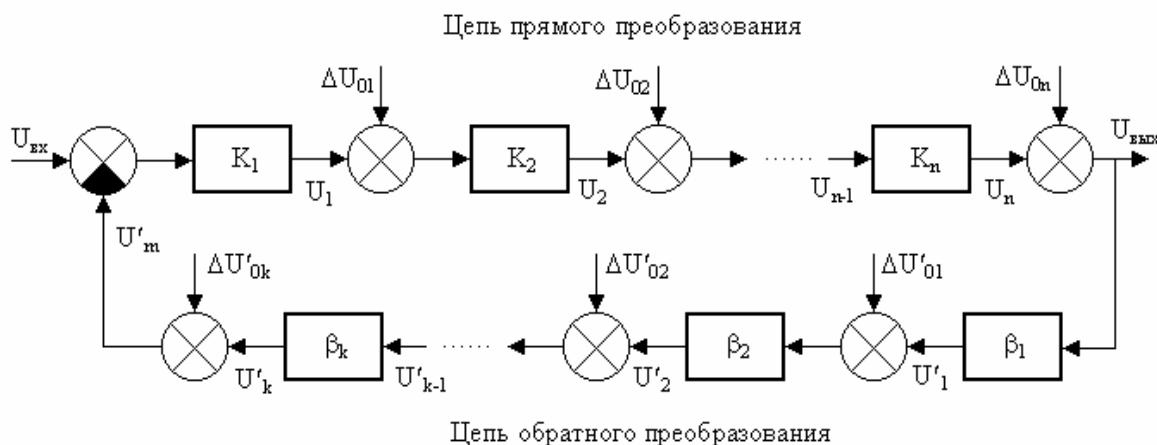


Рис. 5.8. Схема уравновешивающего преобразования

Средства измерений, имеющие такую структуру, могут работать в двух режимах: неполного уравновешивания, когда сигнал рассогласования $\Delta U = U_{\text{вх}} - U'_m \neq 0$, и полного уравновешивания, когда $\Delta U = 0$.

Предполагается, что помехи отсутствуют и $K_i = \text{const}$. Сигнал рассогласования ΔU поступает на вход измерительной цепи прямого преобразования, выходной сигнал которой

$$U_{\text{вых}} = \Delta U K = \Delta U \prod_{i=1}^n K_i , \quad (5.9)$$

где K_i – коэффициент преобразования i -го структурного элемента цепи

прямого преобразования, является входным для цепи обратного преобразования. Ее выходное напряжение:

$$U'_m = \beta U_{вых} = U_{вых} \prod_{i=1}^k \beta_i, \quad (5.10)$$

где β_i – коэффициент преобразования i -го структурного элемента цепи обратного преобразования.

Коэффициент преобразования средства измерения с учетом двух последних уравнений имеет вид

$$K_{СИ} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K \Delta U}{\Delta U + U'_m} = \frac{K \Delta U}{\Delta U + \beta K \Delta U} = \frac{K}{1 + \beta K}, \quad (5.11)$$

а уравнение преобразования соответственно:

$$U_{вых} = \frac{K}{1 + \beta K} U_{вх}. \quad (5.12)$$

Следовательно, выходной сигнал зависит от коэффициентов преобразования цепей прямого и обратного преобразования. При $\beta K \gg 1$

выходное напряжение $U_{вых} \approx \frac{U_{вых}}{\beta}$, цепь прямого преобразования

практически не влияет на работу прибора, поэтому нестабильность коэффициентов преобразования K_i не вызывает погрешности измерения.

Относительная мультипликативная погрешность, обусловленная нестабильностью коэффициентов преобразования K и β , находится из уравнения (5.12):

$$\begin{aligned} \delta U_{вых} &= \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} = \frac{1}{U_{вых}} \left(\frac{\partial U_{вых}}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial U_{вых}}{\partial \beta} \Delta \beta \right) = \\ &= \delta U_{вых}(K) + \delta U_{вых}(\beta) = \frac{\Delta K}{K} \frac{1}{1 + \beta K} - \frac{\Delta \beta}{\beta} \frac{\beta K}{1 + \beta K}, \end{aligned} \quad (5.13)$$

где $\Delta K, \Delta \beta$ – суммарные погрешности, обусловленные нестабильностью коэффициентов K и β . При $\beta K \gg 1$ погрешность $\delta U_{вых}(K)$ от нестабильности коэффициентов преобразования прямой цепи уменьшается в $(1 + \beta K)$ раз. Погрешность $\delta U_{вых}(\beta)$, обусловленная нестабильностью коэффициентов преобразования цепи обратной связи, при этих условиях почти полностью входит в суммарную погрешность. Следовательно, в прямой цепи можно использовать активные нестабильные преобразователи (усилители), но при этом необходимо выполнять условие $\beta K \gg 1$. Коэффициент обратного преобразования β , наоборот, должен иметь высокую стабильность во времени.

Аддитивная погрешность, обусловленная дрейфом нуля, наводками, порогом чувствительности звеньев и другими аналогичными причинами, приведенная ко входу средства измерения, равна:

$$\Delta U_0 = \left(\frac{\Delta U_{01}}{K_1} + \frac{\Delta U_{02}}{K_1 K_2} + \dots + \frac{\Delta U_{0n}}{K_1 K_2 \dots K_n} \right) - (\beta_2 \beta_3 \dots \beta_k \Delta U'_{01} + \beta_3 \beta_4 \Delta U'_{02} + \dots + \Delta U'_{0k}). \quad (5.14)$$

В режиме полного уравновешивания рассогласование $\Delta U = U - U'_m = 0$. Это возможно, если в цепи прямого преобразования имеется интегрирующий элемент с функцией преобразования вида

$$U_i = F \left(\int_0^t U_{i-1} dt \right). \quad (5.15)$$

Коэффициент преобразования полностью определяется параметрами цепи обратной связи и не зависит от параметров цепи прямого преобразования.

Мультипликативная относительная погрешность, связанная с нестабильностью коэффициентов преобразования блоков β_i ,

$$\delta U_{\text{вых}}(\beta) = -\frac{\Delta \beta}{\beta} = -\sum_{i=1}^m \frac{\Delta \beta_i}{\beta_i} \quad (5.16)$$

зависит только от свойств цепи обратной связи.

Аддитивная погрешность схем с полным уравновешиванием почти целиком обусловливается порогом чувствительности звеньев ΔU_P – минимальным сигналом на входе, способным вызвать сигнал на выходе. При входном сигнале меньше ΔU_P сигнал на выходе не появляется. Следовательно, уравновешивание схемы наступает при $U - U'_m = \pm \Delta U_P$. При этом играет роль порог чувствительности звеньев в цепи прямого преобразования до интегрирующего звена включительно.

Приведенная ко входу абсолютная погрешность

$$\Delta U_0 = \Delta U_{01} + \frac{\Delta U_{02}}{K_1} + \frac{\Delta U_{03}}{K_1 K_2} + \dots + \frac{\Delta U_{0i}}{K_1 K_2 \dots K_{i-1}}, \quad (5.17)$$

где ΔU_{0i} – порог чувствительности интегрирующего звена.

Для уменьшения погрешности, обусловленной порогом чувствительности звеньев, следует увеличивать коэффициенты преобразования звеньев прямой цепи. В приведенных формулах фигурирует суммарная погрешность – сумма случайной и систематической составляющих.

Структурная схема цифрового прибора: общий вид и описание

Цифровые приборы – это приборы, принцип действия которых основан на квантовании измеряемой или пропорциональной ей величины. Показания таких приборов представлены в цифровой форме. Наличие операции квантования приводит к появлению у цифровых приборов специфических свойств, обусловливающих существенные различия в методах выбора, анализа, описания и нормирования метрологических характеристик по сравнению с аналоговыми приборами.

В процессе квантования бесконечному множеству значений измеряемой величины ставится в соответствие конечное и счетное множество возможных показаний цифрового прибора. Их число определяется схемой аналого-цифрового преобразователя, выполняющего в цифровом приборе операцию квантования. Одновременно с квантованием, как правило, осуществляется дискретизация по времени измерительных сигналов.

Структурная схема цифрового прибора показана на рис. 5.9.

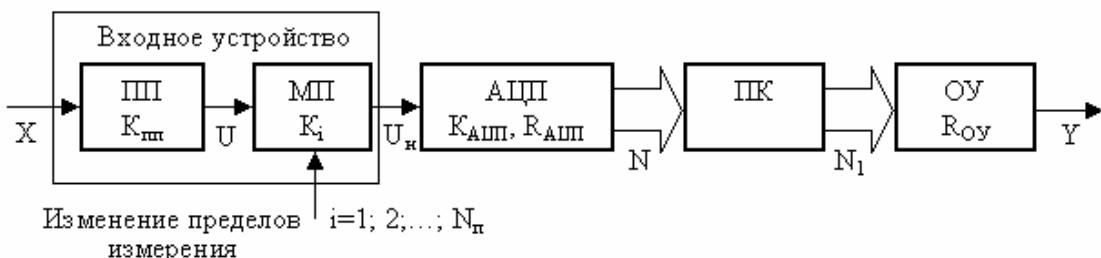


Рис. 5.9. Обобщенная структурная схема цифрового измерительного прибора: ПК – преобразователь кодов; ОУ – отсчетное устройство

Измеряемая физическая величина X воздействует на первичный измерительный преобразователь (ПП), имеющий коэффициент преобразования $K_{ПП}$. Он преобразует величину X в электрический сигнал, в качестве которого используется главным образом напряжение. В рассматриваемом случае $U=K_{ПП}X$. Это напряжение в свою очередь поступает на масштабный измерительный преобразователь (МП), необходимый для изменения пределов измерения цифрового прибора. Он может иметь разное число диапазонов измерения: от 1 до N_n . Диапазон изменения измеряемой величины X разбивается на N_n поддиапазонов: $X_{1min}, \dots, X_{1max}; X_{2min}, \dots, X_{2max}; \dots; X_{nmin}, \dots, X_{nmax}$, где $X_{i min}, \dots, X_{i max}; \dots$ – минимальные и максимальные точки i -го диапазона измерений.

Среди диапазонов измерения выбираются основной и дополнительные. *Основным* считается тот диапазон, на котором измеряемая величина претерпевает наименьшее число преобразований на пути от входа прибора до входа АЦП. Все остальные диапазоны считаются *дополнительными*. На практике возникают ситуации, когда выделить основной диапазон по указанным признакам невозможно. В этом случае в качестве основного выбирают диапазон с наименьшими пределами допускаемых погрешностей или устанавливают его по соглашению. Важной характеристикой цифрового прибора является метод преобразования аналоговой измеряемой величины в ее цифровой эквивалент, реализованный в АЦП. Принято отождествлять принцип действия цифрового измерительного прибора с принципом действия АЦП, входящего в его состав. В настоящее время разработано и используется в средствах измерений большое число различных методов преобразования. К основным из них относятся методы поразрядного уравновешивания (метод последовательных приближений), двойного интегрирования и преобразования напряжения в частоту.

Функции преобразования идеального и реального цифровых приборов отличаются тем, что последняя может иметь смещение относительно нулевой точки, и тем, что действительный размер ступени квантования может отличаться от номинального и быть непостоянным.

Какие существуют виды измерительных установок?

Существует два вида измерительных установок. Измерительную установку, предназначенную для испытания каких-либо изделий, называют **испытательным стендом** (например, для измерения удельного сопротивления электрических материалов или испытания магнитных материалов).

Измерительную установку с включенными в нее эталонами, применяемую для поверки средств измерений, называют **проверочной установкой** (например, установка для поверки вольтметров).

Некоторые большие измерительные установки, используемые в основном в машиностроении, называют **измерительными машинами** (например, силоизмерительная машина, делительная машина).

Измерительная установка позволяет предусмотреть определенный метод измерения и заранее оценить погрешности измерений.

Информационно-измерительная системы: назначение, классификация, построение

Важной разновидностью измерительных систем являются **информационно-измерительные системы** (ИИС), предназначенные для представления измерительной информации в виде, необходимом потребителю [4].

По организации алгоритма функционирования различают системы:

- *с заранее заданным алгоритмом работы*, правила функционирования которых не меняются, поэтому они могут использоваться только для исследования объектов, работающих в постоянном режиме;
- *программируемые*, алгоритм работы которых меняется по заданной программе, составляемой в соответствии с условиями функционирования объекта исследования;
- *адаптивные*, алгоритм работы которых, а иногда и структура, изменяются, приспосабливаясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта.

Наиболее перспективным методом разработки и производства ИИС является метод агрегатно-модульного построения из сравнительно ограниченного набора унифицированных, конструктивно законченных узлов или блоков. При построении агрегатированных систем должны быть решены задачи совместности и сопряжения блоков как между собой, так и с внешними устройствами. Применительно к ИИС существует пять видов совместности:

- 1) *информационная*, которая предусматривает согласованность входных и выходных сигналов по видам и номенклатуре, информативным параметрам и уровням;
- 2) *конструктивная*, обеспечиваемая согласованностью эстетических требований, конструктивных параметров, механических сопряжений блоков при их совместном использовании;
- 3) *энергетическая*, предполагающая согласованность напряжений и токов, питающих блоки;
- 4) *метрологическая*, обеспечивающая сопоставимость результатов измерений, рациональный выбор и нормирование метрологических характеристик блоков, а также согласование параметров входных и выходных цепей;
- 5) *эксплуатационная*, то есть согласованность характеристик блоков по надежности и стабильности, а также характеристик,

определяющих влияние внешних факторов.

Связь между блоками системы и их совместимость устанавливается посредством стандартных интерфейсов.

Интерфейс – совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих объединять блоки в единую систему.

ИВК: определение, виды, выполняемые функции

Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – разновидность ИИС, функционально объединенная совокупность средств измерений, компьютеров и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи.

ИВК имеет блочно-модульную структуру, состоящую из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Техническая подсистема должна содержать средства измерения электрических величин (измерительные компоненты), средства вычислительной техники (вычислительные компоненты), меры текущего времени и интервалов времени, средства ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов с нормированными метрологическими характеристиками.

В *программную подсистему* ИВК входят системное и общее прикладное программное обеспечение (ПО), в совокупности образующие математическое обеспечение ИВК. Системное ПО представляет собой совокупность программного обеспечения компьютера, используемого в ИВК, и дополнительных программных средств, позволяющих работать в диалоговом режиме; управлять измерительными компонентами; обмениваться информацией внутри подсистем комплекса; проводить диагностику технического состояния. Программное обеспечение представляет собой взаимодополняющую, взаимодействующую совокупность подпрограмм, реализующих:

- типовые алгоритмы эффективного представления и обработки измерительной информации, планирования эксперимента и других измерительных процедур;
- архивирование данных измерений;
- метрологические функции ИВК (аттестация, поверка, экспериментальное определение метрологических характеристик и т.п.).

ИВК предназначены для выполнения таких функций, как:

- осуществление прямых, косвенных, совместных или

совокупных измерений физических величин;

- управление процессом измерений и воздействием на объект измерений;
- представление оператору результатов измерений в требуемом виде.

Для реализации этих функций ИВК должен обеспечивать:

- восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных измерительных преобразователей;
- управление средствами измерений и другими техническими компонентами, входящими в состав ИВК;
- выработку нормированных сигналов, являющихся входными для средств воздействия на объект;
- оценку метрологических характеристик и представление результатов измерений в установленной форме.

По назначению ИВК делятся на три группы:

1. Типовые, предназначенные для решения широкого круга типовых задач автоматизации измерений, испытаний или исследований независимо от области применения.
2. Проблемные, разрабатываемые для решения специфичной для конкретной области применения задачи автоматизации измерений.
3. Специализированные, предназначенные для решения уникальных задач автоматизации измерений.

Структурная схема ИВК: общий вид и описание

Структурная схема ИВК представлена на рис. 5.10.

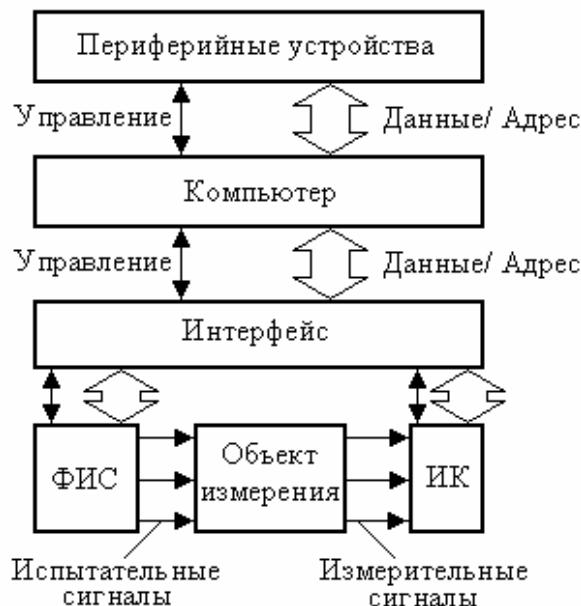


Рис. 5.10. Структурная схема ИВК

Основными составными частями комплекса являются:

- компьютер с периферийными устройствами, подключенными к нему, в том числе и посредством компьютерной сети;
- программное обеспечение, представляющее собой совокупность взаимосвязанных программ, написанных на алгоритмических языках разного уровня;
- интерфейс, организующий связь технических устройств ИВК с компьютером;
- формирователь испытательных сигналов (ФИС), которыми воздействуют на объект измерения с целью получения измерительных сигналов. Каждый такой сигнал вырабатывается с помощью последовательно соединенных ЦАП и преобразователя «напряжение – испытательный сигнал»;
- измерительные каналы (ИК), предназначенные для преобразования в цифровой код заданного числа сигналов. Структура измерительного канала существенно зависит от решаемой задачи. Однако практически в любом случае каждый из них содержит аналоговый измерительный преобразователь и АЦП. При обработке нескольких измерительных сигналов одним АЦП в состав комплекса включается коммутатор, предназначенный для поочередного подключения сигналов ко входу АЦП.

Аналоговый измерительный преобразователь предназначен для преобразования измерительного сигнала в сигнал, однородный с входным сигналом АЦП (то есть в напряжение), и масштабирования (усиления или ослабления) его до уровня, необходимого для проведения операции аналого-цифрового преобразования с минимальной погрешностью.

АЦП преобразует сигнал в цифровой код и передает его через интерфейс в компьютер. Работой всей аппаратной части ИВК управляет компьютер. Это осуществляется посредством:

- подачи управляющих сигналов различного рода;
- считывания и передачи по требуемым адресам цифровой информации (сигналы «Данные» и «Адрес»). Под «Адресом» понимается уникальный цифровой код, присвоенный конкретному блоку ИВК или его части и позволяющий компьютеру через интерфейс однозначно идентифицировать данное устройство.

Измерительные сигналы, представляющие собой отклик объекта измерения на испытательные воздействия, преобразуются в измерительных каналах в двоичный цифровой код и

считываются компьютером. Полученные коды обрабатываются по заданным алгоритмам, в результате получается искомая измерительная информация.



Отсчетное устройство: назначение, составные части, метрологические характеристики

Отсчетное устройство предназначено для преобразования измерительного сигнала в форму, удобную для восприятия органами чувств человека. Составными частями отсчетного устройства являются шкала и указатель.

Шкала наносится на прямолинейном участке или дуге окружности. Для цифровых шкал числа являются эквивалентами отметок шкалы. Отметки на шкалах могут быть нанесены равномерно или неравномерно. В связи с этим шкалы называют *равномерными* и *неравномерными*. Практически равномерной считается шкала, длины делений которой отличаются не более чем на 30% и имеют постоянную цену деления.

Длиной деления шкалы называется расстояние между осями или центрами двух соседних отметок шкалы, измеренное вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы. Линия может быть реальной или воображаемой, кривой или прямой.

Отметки наносятся на шкалу при градуировке прибора, то есть при подаче на его вход сигнала с выхода образцовой многозначной меры.

Указатель выполняется в виде подвижных стрелок разной формы (клиновидной, ножевидной и др.), луча света, пера самописца и т.п.

Шкала средства измерения имеет начальное и конечное значения. Они соответствуют наименьшему и наибольшему значениям измеряемой величины, которые могут быть отсчитаны по шкале средства измерения.

При измерении с показывающего устройства считывается показание.

ГЛАВА 6

ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

6.1. Термины и определения

Показание средства измерений – значение величины или число на показывающем устройстве средства измерений.

Вариация показаний измерительного прибора – разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

➤ В высокочувствительных (особенно в электронных) измерительных приборах вариация приобретает иной смысл и может быть раскрыта как колебание его показаний около среднего значения (показание «дышит»).

Диапазон показаний средства измерений – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Глава 6. Параметры и свойства средств измерительной техники

Диапазон измерений средства измерений – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений.

➤ Значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно *нижним пределом измерений* или *верхним пределом измерений*.

Чувствительность измерительного прибора – свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины.

➤ Различают *абсолютную* и *относительную* чувствительность. Абсолютную чувствительность определяют по формуле $S = \Delta l / \Delta X$, относительную чувствительность – по формуле $S_0 = \frac{\Delta l}{\Delta X / X}$, где Δl – изменение сигнала на выходе, X – измеряемая величина, ΔX – изменение измеряемой величины.

Порог чувствительности средства измерений – характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

➤ 1. Если самое незначительное изменение массы, которое вызывает перемещение стрелки весов, составляет 10 мг, то порог чувствительности весов равен 10 мг.

2. На практике применяются термины: *реагирование* и *порог реагирования*, *подвижность средства измерений* и *порог подвижности*, *срабатывание* и *порог срабатывания*. Иногда применяют термин *пороговая чувствительность*. Это свидетельствует о том, что терминология для выражения понятий, связанных со свойствами средства измерений реагировать на малые изменения измеряемых величин, еще не устоялась. В целях упорядочения терминологии эти термины следует рассматривать как синонимы и не применять их.

Разрешение средства измерений – характеристика средства измерений, выражаемая наименьшим интервалом времени между отдельными импульсами или наименьшим расстоянием между объектами, которые фиксируются прибором раздельно.

➤ Исходя из указанного определения, различают *временное разрешение* и *пространственное разрешение*.

Градуировочная характеристика средства измерения – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально.

➤ Градуировочная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы.

Зона нечувствительности средства измерений – диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают выходного сигнала средства измерений.

➤ Иногда зону называют *мертвой*. Она наблюдается вблизи некоторых радионавигационных систем или измерительных установок. Например, зона нечувствительности у судовой радиолокационной установки, зависящая от размеров судна и высоты антенны радиолокационной установки над судовыми надстройками.

Тип средства измерений – совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

➤ Средства измерений одного типа могут иметь различные модификации (например, отличаться по диапазону измерений).

Вид средства измерений – совокупность средств измерений, предназначенных для измерений данной физической величины.

➤ Вид средств измерений может включать несколько их типов.

Амперметры и вольтметры (вообще) являются видами средств измерений, соответственно, силы электрического тока и напряжения.

6.2. Основные вопросы для изучения темы

?

Статические характеристики средств измерений: функция преобразования

Основной характеристикой средства измерения в статическом режиме является **функция (уравнение) преобразования** – зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала. В общем виде она может быть записана так [5]:

$$Y\{b_0[X], b_1, \dots, b_m, S_1, \dots, S_L, \xi_1, \dots, \xi_k\} = F\{X\{a_0[\Psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\}, S_1, \dots, S_L\}, \quad (6.1)$$

где F – некоторый функционал, описывающий ряд определенных математических операций, производимых над входной величиной X .

При разработке средств измерений стремятся к тому, чтобы обеспечить линейную связь между входной и выходной величинами:

$$Y\{b_0[X], b_1, \dots, b_m, S_1, \dots, S_L, \xi_1, \dots, \xi_k\} = K(S_1, \dots, S_L)X\{a_0[\Psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (6.2)$$

или в упрощенной форме записи $Y(t) = KX(t)$, где K – коэффициент преобразования.

Различают три вида функций преобразования:

- номинальную F , которая указывается в нормативно-технической документации на данный тип средства измерения. Она устанавливается для стандартизованных средств измерений массового производства;
- индивидуальную F_u , которая принимается для конкретного экземпляра средства измерений и устанавливается путем экспериментальных исследований этого экземпляра при определенных значениях влияющих величин;
- действительную F_d , которая совершенным образом (без погрешностей) отражает зависимость информативного параметра выходного сигнала в тех условиях и в тот момент времени, когда эта зависимость определяется.



Статические характеристики средств измерений: функция влияния, импедансные характеристики

Существует ряд характеристик и параметров средств измерений, которые описывают некоторые их свойства безотносительно к режиму работы. Воздействие влияющих величин на характеристики средства измерения описывается **функцией влияния** $\Psi(\xi)$ – зависимостью изменения характеристик и параметров от изменения влияющей величины ξ или совокупности влияющих величин ξ_1, \dots, ξ_n .

Импедансные характеристики – характеристики, описывающие свойства средства измерения отбирать или отдавать энергию через свои входные или выходные цепи. Для электрических средств измерений это, прежде всего, входные и выходные сопротивления и емкости.



Статические характеристики нелинейных элементов (зона нечувствительности, насыщение, насыщение с зоной нечувствительности)

Зона нечувствительности возникает в механизмах с пружинной нагрузкой, а также во многих других устройствах, нечувствительных к малым входным сигналам, например, в различного типа измерительно-преобразовательных элементах (индуктивные, емкостные, потенциометрические измерители-преобразователи), усилительно-преобразовательных и исполнительных элементах. Статическая характеристика элемента с нелинейностью такого типа представлена на рис. 6.1.

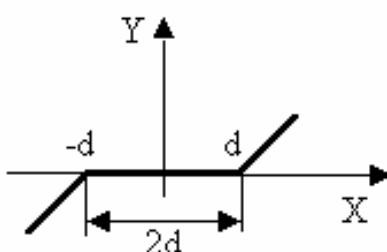


Рис. 6.1. Статическая характеристика зоны нечувствительности

Характеристику нелинейности типа зона нечувствительности можно описать следующей зависимостью:

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq d; \\ k(X - d) & \text{при } X > d; \\ k(X + d) & \text{при } X < -d, \end{cases} \quad (6.3)$$

где величина d определяет ширину зоны нечувствительности элемента к изменению входного сигнала.

Коэффициент гармонической линеаризации определяется следующим образом:

$$k(a) = k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{d}{a} + \frac{d}{a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} \right); \quad k'(a) = 0, \quad (6.4)$$

где a – амплитуда входного гармонического сигнала.

Насыщение является самым распространенным видом нелинейности. Форма характеристики насыщения идентична для многих реальных устройств, хотя входные и выходные величины могут иметь самую различную физическую природу.

Статическая характеристика нелинейности типа насыщение представлена на рис. 6.2.

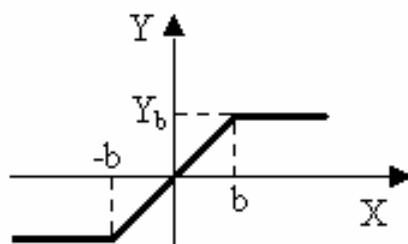


Рис. 6.2. Статическая характеристика насыщения

Аналитическое выражение для статической характеристики типа насыщение имеет вид

$$Y = \begin{cases} kX & \text{при } |X| \leq b; \\ Y_b \operatorname{sign} X & \text{при } |X| > b. \end{cases} \quad (6.5)$$

Величина b определяет значение входного сигнала, при котором наступает насыщение в элементе; Y_b – максимально возможный уровень выходного сигнала.

Коэффициент гармонической линеаризации определяется по следующей формуле:

$$k(a) = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a} + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \right); \quad k'(a) = 0. \quad (6.6)$$

Одни и те же элементы систем могут обладать как свойством нечувствительности, так и свойством насыщения. При малых входных сигналах эти элементы ведут себя подобно элементу с нелинейностью типа зоны нечувствительности, а при больших сигналах – подобно элементу с ограничением выходного сигнала.

На рис. 6.3 показан общий вид статической характеристики зоны нечувствительности с насыщением.

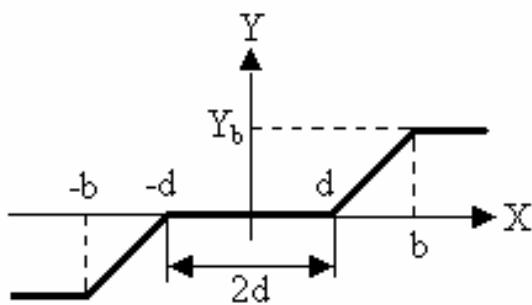


Рис. 6.3. Статическая характеристика зоны нечувствительности с насыщением

Статическая характеристика такого типа нелинейности описывается следующими уравнениями:

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq d; \\ k(X - d) & \text{при } d < X < -d; \\ k(X + d) & \text{при } -b < X < -d; \\ Y_b \operatorname{sign} X & \text{при } |X| > b. \end{cases} \quad (6.7)$$

Коэффициент гармонической линеаризации определяется следующим образом:

$$k(a) = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a} - \arcsin \frac{d}{a} + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} - \frac{d}{a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} \right); \quad k'(a) = 0. \quad (6.8)$$

Эта типовая нелинейность представляет собой достаточно общий случай однозначной непрерывной нелинейности.

Динамические характеристики средств измерений: дифференциальные уравнения

Реальные средства измерений обладают инерционными (динамическими) свойствами, обусловленными особенностями используемых элементов. Это приводит к более сложной зависимости между входным и выходным сигналами. Свойства средства измерения в динамических режимах, то есть когда время изменения измеряемой

величины сравнимо со временем измерения, описываются совокупностью так называемых **динамических характеристик**.

Основной из них является *полная динамическая характеристика*, полностью описывающая принятую математическую модель динамических свойств средства измерения. В качестве ее используют: дифференциальные уравнения; переходную, импульсную переходную, амплитудно-фазовую и амплитудно-частотную характеристики; совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик; передаточную функцию.

Дифференциальные уравнения наиболее полно описывают динамические свойства средства измерения.

$$b_m \frac{d^m Y(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} Y(t)}{dt^{m-1}} + \dots + Y(t) = K_0 X(t), \quad (6.9)$$

где K_0, b_m, b_{m-1}, \dots – постоянные коэффициенты.

Его решение $Y(t)$ описывает выходной сигнал средства измерений при входном сигнале $X(t)$. Порядок уравнения (6.9) бывает довольно высоким, по крайней мере, выше второго. Его решение даже при известном виде функции $Y(t)$ весьма затруднено. Дифференциальные уравнения высокого порядка могут быть представлены системой дифференциальных уравнений первого и второго порядков.

Динамические характеристики средств измерений: переходная и импульсная переходная характеристики

Переходная характеристика $h(t)$ – это времененная характеристика средства измерения, полученная в результате подачи на его вход сигнала в виде единичной функции заданной амплитуды:

$$X(t) = X_m \cdot l(t). \quad (6.10)$$

Она описывает инерционность средства измерения, обусловливающую запаздывание и искажение выходного сигнала относительно входного. Переходную характеристику находят либо опытным путем, либо решая соответствующее дифференциальное уравнение.

Импульсная переходная характеристика $g(t)$ – это времененная характеристика средства измерения, полученная в результате приложения к его входу сигнала в виде дельта-функции. Переходная и импульсная характеристики связаны между собой:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (6.11)$$

Как и дифференциальное уравнение, эти характеристики в полной мере определяют динамические свойства средства измерения.

Переходная и импульсная характеристики элементов первого порядка имеют вид

$$h(t) = X_m K_0 \left(1 - e^{-t/T}\right), \quad g(t) = \frac{X_m K_0}{T} e^{-t/T}. \quad (6.12)$$



Динамические характеристики средств измерений: частотные характеристики и передаточная функция

К частотным характеристикам относятся амплитудно-фазовая $G(j\omega)$, амплитудно-частотная $A(\omega)$ и фазочастотная $\varphi(\omega)$ характеристики. Частотные методы анализа основаны на исследовании прохождения гармонических колебаний различных частот через средство измерения. Если на вход линейного средства измерения подать входной сигнал

$$X(j\omega) = X_m(\omega) e^{j\omega t}, \quad (6.13)$$

то выходной сигнал можно записать в виде

$$Y(j\omega) = Y_m e^{j(\omega + \varphi(\omega))} = \dot{Y}_m e^{j\omega t}. \quad (6.14)$$

Амплитудно-фазовой характеристикой называют отношение

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{\dot{Y}_m(\omega)}{\dot{X}_m(\omega)} = \frac{Y_m(\omega)}{X_m(\omega)} e^{j\varphi(\omega)}. \quad (6.15)$$

Она описывает изменение показаний средства измерения при изменении частоты входного сигнала и характеризует только установившийся режим его работы.

В практике измерений получила большое распространение *амплитудно-частотная характеристика* (АЧХ)

$$A(\omega) = |G(j\omega)| = Y_m(\omega) / X_m(\omega), \quad (6.16)$$

представляющая собой зависящее от круговой частоты отношение амплитуды выходного сигнала линейного средства измерения в установившемся режиме к амплитуде входного сигнала.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ – это зависящая от частоты разность фаз между выходным сигналом и входным синусоидальным сигналом линейного средства измерения в установившемся режиме.

Для элемента первого порядка амплитудно-фазовая характеристика, АЧХ и ФЧХ равны:

$$G(j\omega) = \frac{K_0}{1 + j\omega T}; \quad A(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \quad \varphi(\omega) = -\arctg(\omega T). \quad (6.17)$$

Передаточная функция $G(p)$ – это отношение преобразования Лапласа выходного сигнала средства измерения к преобразованию Лапласа входного сигнала при нулевых начальных условиях. Уравнение (6.9) можно записать в виде

$$(b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p^1 + 1)Y(p) = K_0 X(p), \quad (6.18)$$

где $X(p)$, $Y(p)$ – изображения по Лапласу входного и выходного сигналов средства измерения. Их отношение является передаточной функцией

$$G(p) = Y(p) / X(p) = K_0 / (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p^1 + 1). \quad (6.19)$$

Элемент первого порядка имеет передаточную функцию

$$G(p) = \frac{K_0}{Tp + 1}. \quad (6.20)$$

ГЛАВА 7

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

7.1. Термины и определения

Метрологическая характеристика средства измерений – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

- 1. Для каждого типа средств измерений устанавливают свои метрологические характеристики.
- 2. Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называют *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые экспериментально – *действительными метрологическими характеристиками*.

Номинальное значение меры – значение величины, указанное на мере или приписанное ей.

- Резисторы с номинальным значением 1 Ом, гиря с номинальным значением 1 кг. Нередко номинальное значение указывают на мере.

Действительное значение меры – значение величины, приписанное мере на основании ее калибровки или поверки.

➤ В состав государственного эталона единицы массы входит платиноиридиевая гиря с номинальным значением массы 1 кг, тогда как действительное значение ее массы составляет 1,000000087 кг, полученное в результате международных сличений с международным эталоном килограмма, хранящимся в Международном Бюро Мер и Весов (МБМВ) (в данном случае это калибровка).

Класс точности средства измерений – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

➤ 1. Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерений одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств. Это важно при выборе средств измерений в зависимости от заданной точности измерений.

2. Класс точности средств измерений конкретного типа устанавливают в стандартах технических требований (условий) или в других нормативных документах.

Метрологическая исправность средства измерений – состояние средства измерений, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Метрологическая надежность средства измерений – надежность средства измерений в части сохранения его метрологической исправности.

Метрологический отказ средства измерений – выход метрологической характеристики средства измерений за установленные пределы.

➤ Если погрешность средства измерений класса точности 0,01 стала превышать 0,01%, то это значит, что произошел метрологический отказ и средство измерений уже не соответствует установленному ранее классу точности. Если не установлены технические неполадки, то средству измерений может быть присвоен другой, более низкий класс точности.

7.2. Основные вопросы для изучения темы

Метрологические характеристики средств измерений

Каждому виду средств измерений приписываются определенные номинальные (в данном случае близкие к теоретическим) **метрологические характеристики** (МХ). Реальные же характеристики средств измерений, как правило, не совпадают с номинальными, что и определяет их инструментальные погрешности.

К метрологическим характеристикам средств измерений относятся те, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. С помощью этих характеристик оценивается погрешность измерений, выполняемых используемыми средствами измерений в известных условиях. Для совокупности рабочих средств измерений определенного типа данные о МХ содержатся в нормах, установленных в соответствующих нормативно-технических документах. Причем отдельный экземпляр средств измерений должен иметь МХ, не выходящие за пределы, оговоренные в вышеуказанных документах.

Средства измерений могут применяться в нормальных и рабочих условиях. Эти условия для конкретных видов средств измерений установлены в стандартах или технических условиях.

Нормальным условиям применения средств измерений должен удовлетворять ряд следующих (основных) требований: температура окружающего воздуха $(20\pm 5)^\circ\text{C}$; относительная влажность $(65\pm 15)\%$; атмосферное давление (100 ± 4) кПа; напряжение питающей сети (220 ± 4) В и $(115\pm 2,5)$ В; частота сети (50 ± 1) Гц и (400 ± 12) Гц. Как следует из перечисленных требований, нормальные условия применения средств измерений характеризуются диапазоном значений влияющих на них величин типа климатических факторов и параметров электропитания.

Рабочие условия применения средств измерений определяются диапазоном значений влияющих величин не только климатического характера и параметров электропитания, но и типа механических воздействий. В частности, диапазон климатических воздействий делится на ряд групп, охватывающих широкий диапазон изменения окружающей температуры.

Одной из важнейших МХ является погрешность средств измерения, позволяющая оценить инструментальную погрешность (точность) измерения ими физической величины.



Основные задачи метрологических характеристик средств измерений

При использовании средств измерений принципиально важно знать степень соответствия информации об измеряемой величине, содержащейся в выходном сигнале, ее истинному значению. С этой целью для каждого средства измерения вводятся и нормируются определенные метрологические характеристики. Номенклатура МХ, правила выбора комплексов нормируемых МХ для средств измерений и способы их нормирования определяются стандартом ГОСТ 8.009–84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

Метрологические характеристики средств измерений позволяют:

- определять результаты измерений и рассчитывать оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерения в реальных условиях применения средства измерения;
- рассчитывать МХ каналов измерительных систем, состоящих из ряда средств измерений с известными МХ;
- производить оптимальный выбор средств измерений, обеспечивающих требуемое качество измерений при известных условиях их применения;
- сравнивать средства измерений различных типов с учетом условий применения.



Что необходимо знать при разработке принципов выбора и нормирования средств измерений

При разработке принципов выбора и нормирования средств измерений необходимо придерживаться ряда положений, изложенных ниже.

1. Основным условием возможности решения всех перечисленных задач является наличие однозначной связи между нормированными МХ и инструментальными погрешностями. Эта связь устанавливается посредством математической модели инструментальной составляющей погрешности, в которой нормируемые МХ должны быть аргументами. При этом важно, чтобы номенклатура МХ и способы их выражения были оптимальны. Опыт

эксплуатации различных средств измерений показывает, что целесообразно нормировать комплекс МХ, который, с одной стороны, не должен быть очень большим, а с другой – каждая нормируемая МХ должна отражать конкретные свойства средства измерений и при необходимости может быть проконтролирована.

2. Нормирование МХ средств измерений должно производиться исходя из единых теоретических предпосылок. Это связано с тем, что в измерительных процессах могут участвовать средства измерений, построенные на различных принципах.

3. Нормируемые МХ должны быть выражены в такой форме, чтобы с их помощью можно было обоснованно решать практически любые измерительные задачи и одновременно достаточно просто проводить контроль средства измерений на соответствие этим характеристикам.

4. Нормируемые МХ должны обеспечивать возможность статистического объединения, суммирования составляющих инструментальной погрешности измерений. В общем случае она может быть определена как сумма (объединение) следующих составляющих погрешности:

- $\Delta_0(t)$, обусловленной отличием действительной функции преобразования в нормальных условиях от номинальной, приписанной соответствующими документами данному типу средств измерений. Эта погрешность называется *основной*;
- Δ_{Cj} , обусловленной реакцией средства измерения на изменение внешних влияющих величин и неинформационных параметров входного сигнала относительно их номинальных значений. Эта погрешность называется *дополнительной*;
- Δ_{dyn} , обусловленной реакцией средства измерения на скорость (частоту) изменения входного сигнала. Эта составляющая, называемая *динамической погрешностью*, зависит и от динамических свойств средств измерений, и от частотного спектра входного сигнала;
- Δ_{int} , обусловленной взаимодействием средства измерения с объектом измерений или с другими средствами измерений, включенным последовательно с ним в измерительную систему. Эта погрешность зависит от характеристик и параметров входной цепи средства измерения и выходной цепи объекта измерений.

Таким образом, инструментальную составляющую погрешности средства измерения можно представить в виде

$$\Delta = \Delta_0(t) * \sum_{j=1}^L \Delta_{cj} * \Delta_{dyn} * \Delta_{int}, \quad (7.1)$$

где $*$ – символ статистического объединения составляющих.

Первые две составляющие представляют собой статическую погрешность средства измерения, а третья – динамическую. Из них только основная погрешность определяется свойствами средства измерения. Дополнительная и динамическая погрешности зависят как от свойств самого средства измерения, так и от некоторых других причин (внешних условий, параметров измерительного сигнала и др.).

Требования к универсальности и простоте статистического объединения составляющих инструментальной погрешности обусловливают необходимость их статистической независимости – некоррелированности. Однако предположение о независимости этих составляющих не всегда верно.

Выделение динамической погрешности средства измерения как суммируемой составляющей допустимо только в частном, но весьма распространенном случае, когда средство измерения можно считать линейным динамическим звеном и когда погрешность является весьма малой величиной по сравнению с выходным сигналом. Динамическое звено считается линейным, если оно описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для средств измерений, являющихся существенно нелинейными звеньями, выделение в отдельно суммируемые составляющие статической и динамической погрешностей недопустимо.

5. Нормируемые МХ должны быть инвариантны к условиям применения и режиму работы средства измерения и отражать только его свойства. Выбор МХ необходимо осуществлять так, чтобы пользователь имел возможность рассчитывать по ним характеристики средства измерения в реальных условиях эксплуатации.

6. Нормируемые МХ, приводимые в нормативно-технической документации, отражают свойства не отдельно взятого экземпляра средства измерений, а всей совокупности средств измерений данного типа, то есть являются номинальными. Под типом понимается совокупность средств измерений, имеющих одинаковое назначение, схему и конструкцию и удовлетворяющих одним и тем же требованиям, регламентированным в технических условиях. Метрологические характеристики отдельного средства измерения данного типа могут быть любыми в пределах области значений номинальных МХ. Отсюда следует, что МХ средства измерений данного типа должна описываться как нестационарный случайный процесс. Математически строгий учет данного обстоятельства требует нормирования не только пределов МХ как случайных величин, но и их временной зависимости (то есть автокорреляционных функций).

Это приведет к чрезвычайно сложной системе нормирования и практической невозможности контроля МХ, поскольку при этом он должен был бы осуществляться в строго определенные промежутки времени. Вследствие этого принята упрощенная система нормирования, предусматривающая разумный компромисс между математической строгостью и необходимой практической простотой. В принятой системе низкочастотные изменения случайных составляющих погрешности, период которых соизмерим с длительностью межпроверочного интервала, при нормировании МХ не учитываются. Они определяют показатели надежности средства измерения, обусловливают выбор рациональных межпроверочных интервалов и других аналогичных характеристик. Высокочастотные изменения случайных составляющих погрешности, интервалы корреляции которых соизмеримы с длительностью процесса измерения, необходимо учитывать путем нормирования, например, их автокорреляционных функций.

Перечень нормируемых метрологических характеристик

Перечень нормируемых МХ делится на шесть основных групп (рис. 7.1), которые и рассматриваются далее [4].



Рис. 7.1. Номенклатура метрологических характеристик средств измерений



Метрологические характеристики влияния на инструментальную составляющую погрешности измерения

К указанным характеристикам относятся характеристики средств измерений, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую вследствие взаимодействия средства измерения с любым из подключенных к его входу или выходу компонентов, например объектом измерений и др. Потребление энергии средством измерений от объекта измерения или от предвключенного прибора приводит к изменению значения измеряемой величины и, следовательно, к появлению соответствующей составляющей погрешности. Например, на погрешность измерения температуры с помощью термопар и термометров существенно влияет обмен тепловой энергией между объектом и прибором. Следовательно, для средств измерений, работа которых характеризуется обменом энергией между ними и подключенными к их входу или выходу объектами, необходимо нормировать некоторые характеристики, описывающие свойства этих приборов отбирать или отдавать энергию через свои входные или выходные цепи. Такие характеристики часто называют *импедансными*, или просто *импедансами*.

Рассматриваемые характеристики нормируются путем установления номинальных значений импедансных характеристик и пределов допускаемых отклонений от них.

Конкретные способы оценки составляющих, обусловленных взаимодействием средства измерения с объектом измерений, зависят от характера этого взаимодействия и вида импедансной характеристики. В практике электрических измерений достаточно распространен случай, когда взаимодействие заключается в потреблении средством измерений энергии от объекта измерений и когда соответствующее свойство описывается входным импедансом. Эквивалентная схема подключения средства измерения к объекту измерения показана на рис. 7.2.

По условиям измерительной задачи необходимо измерить эдс $E(j\omega)$, записанную в комплексной форме. Объект измерения, обладающий выходным импедансом $Z_0(j\omega)$, подключен к средству измерения через линию связи, имеющую эквивалентное сопротивление $Z_{lc}(j\omega)$.

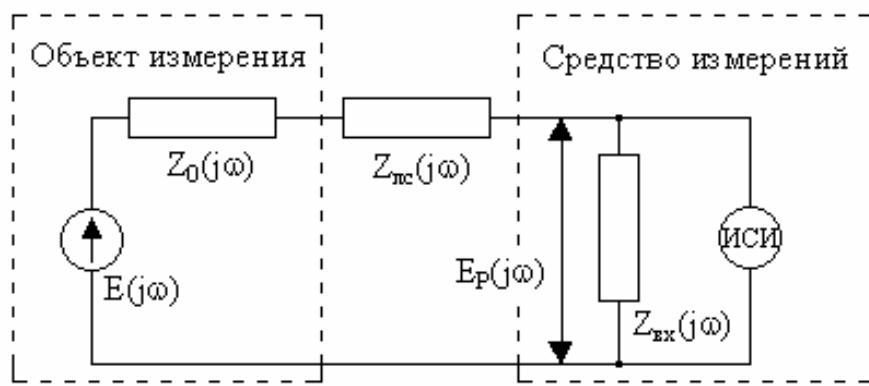


Рис. 7.2. Эквивалентная схема подключения средства измерения к объекту измерения (ИСИ – идеальное средство измерений)

Средство измерений на схеме представлено в виде параллельного соединения его входного импеданса $Z_{ex}(j\omega)$ и идеального средства измерений (ИСИ), имеющего бесконечно большой импеданс. Составляющая погрешности измерений, обусловленная взаимодействием объекта и средства измерения, описывается следующим образом:

$$\Delta = E(j\omega) - E_p(j\omega) = E(j\omega) \left[1 - \frac{Z_{ex}(j\omega)}{Z_{ex}(j\omega) + Z_{вых}(j\omega)} \right] = \frac{E(j\omega)Z_{вых}(j\omega)}{Z_{ex}(j\omega) + Z_{вых}(j\omega)}, \quad (7.2)$$

где $E_p(j\omega)$ – эдс на входе средства измерения;
 $Z_{вых}(j\omega) = Z_0(j\omega) + Z_{rc}(j\omega)$ – выходной импеданс объекта измерений, включая линию связи.

Зная комплексные величины $E(j\omega)$, $Z_{ex}(j\omega)$, $Z_0(j\omega)$ и $Z_{rc}(j\omega)$, можно рассчитать характеристики и параметры погрешности влияния.

Импедансные характеристики электронных средств измерений нормируются путем представления его входных цепей в виде эквивалентной схемы замещения и задания значений составляющих ее элементов.

Некоторые схемы замещения приведены в таблице 7.1 (цифрами 1 и 2 обозначены входные клеммы средства измерения).

Таблица 7.1

Схема замещения входных цепей	Нормируемые параметры элементов схем замещения	Средства измерений, для которых применяется данная схема замещения
	Минимально допустимое значение внутреннего сопротивления R_{bh}	Вольтметры, имеющие во входной цепи делитель или линейный усилитель с нулевыми входными токами. Амперметры. Генераторы
	Минимально допустимое значение внутреннего сопротивления R_{bh} и максимально допустимое значение внутренней емкости C_{bh}	Высокочастотные вольтметры. Цифровые частотометры. Каналы вертикального отклонения осциллографов
	Минимально допустимое значение внутреннего сопротивления R_{bh} и максимально допустимое значение входного тока I_{bh}	Цифровые вольтметры постоянного тока, имеющие на входе линейный усилитель
	Минимально допустимое значение внутреннего сопротивления R_{bh} и значение внутреннего постоянного напряжения U_{bh} при свободных зажимах 1 и 2 или максимальное значение входного тока при закороченных зажимах 1 и 2	Цифровые и аналоговые омметры, универсальные вольтметры в режиме измерения сопротивления
	Минимальное значение входного дифференциального сопротивления r_{bh} , значения амплитуды и длительности импульсов напряжения $e_{bh}(t)$ или тока $i_{bh}(t)$, возникающих во входной цепи в результате уравновешивания входного сигнала	Цифровые вольтметры, использующие кодо- или времязимпульсные методы измерения



Класс точности средства измерения: пределы допускаемой основной погрешности

Классы точности средств измерений устанавливаются в стандартах или технических условиях. Средство измерений может иметь два и более класса точности. Например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины ему можно присваивать два или более класса точности. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемой основной погрешности Δ_{CI} , определяемые классом точности, – это интервал, в котором находится значение основной погрешности средства измерения. Если средство измерения имеет незначительную случайную составляющую, то определение Δ_{CI} относится к нахождению систематической погрешности и случайной погрешности, обусловленной гистерезисом, и является достаточно строгим. При этом предел

$$\Delta_{CI} = \Delta_{OSP} + 0,5H_{OP}. \quad (7.3)$$

Если средство измерения имеет существенную случайную погрешность, то для него определение предела допускаемой основной погрешности является нечетким. Его следует понимать как интервал, в котором находится значение основной погрешности с неизвестной вероятностью, близкой к единице:

$$\Delta_{CI} = \pm \left(\Delta_{OSP} + K\sigma \left[\overset{\circ}{\Delta} \right] + 0,5H_{OP} \right), \quad (7.4)$$

где K – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P .

Пределы допускаемой основной погрешности выражают в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей. Выбор формы представления зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средства измерения.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливаются по одной из формул:

$$\Delta = \pm a \quad \text{или} \quad \Delta = \pm (a + bX), \quad (7.5)$$

где X – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале; a, b – положительные числа, не зависящие от X .

Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность (рис. 7.3, а), а вторая – сумму аддитивной и мультипликативной погрешностей (рис. 7.3, в).

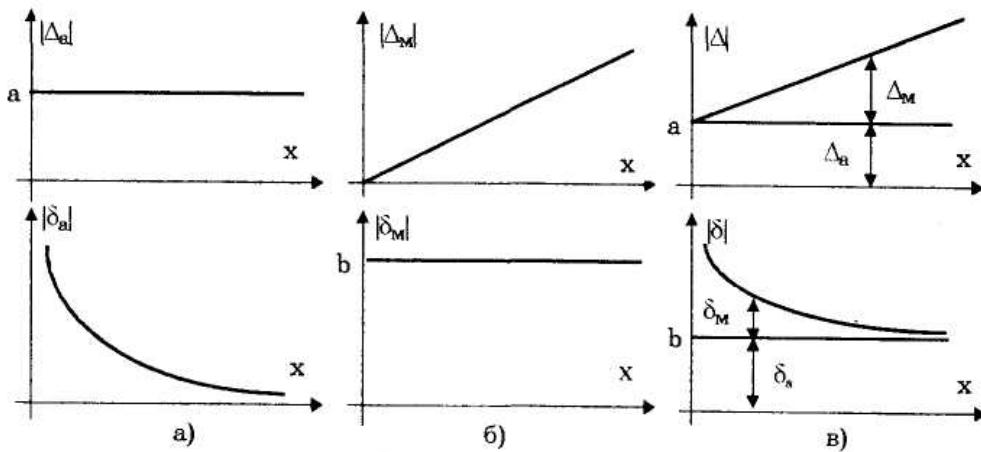


Рис. 7.3. Аддитивная (а), мультипликативная (б) и суммарная (в) погрешности в абсолютной и относительной формах

В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «Класс точности М», а на приборе – буквой «М». Для обозначения используются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причем меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (7.6)$$

где X_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ; p – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда значений: $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6)10^n$; $n=1; 0; -1; -2; \dots$

Нормирующее значение X_N устанавливается равным большему из пределов измерений (или модулю разности пределов измерений) для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалами и для измерительных преобразователей, если нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений.

Для средств измерений, шкала которых имеет условный нуль, X_N равно модулю разности пределов измерений. Например, для вольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений 100 и 600°C нормирующее значение равно 500°C . Для средств измерений с заданным номинальным значением X_N устанавливают равным этому значению.

Для приборов с существенно неравномерной шкалой X_N

принимают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины. В остальных рассмотренных случаях класс точности обозначают конкретным числом p , например 1,5. Обозначение наносится на циферблат, щиток или корпус прибора.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности определяются по формуле

$$\delta = \pm \frac{100\Delta}{X} = \pm q, \quad \text{если} \quad \Delta = \pm a. \quad (7.7)$$

Значение постоянного числа q устанавливается так же, как и значение числа p . Класс точности на прибор обозначается в виде **0,5**, где 0,5 – конкретное значение q .

В случае, если абсолютная погрешность задается формулой $\pm(a+bX)$, пределы допускаемой относительной основной погрешности:

$$\delta = \Delta / X = \pm [c + d(|X_k / X| - 1)], \quad (7.8)$$

где c, d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда: (1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) 10^n ; $n=1; 0; -1; -2$ и т.д.; X_k – больший (по модулю) из пределов измерений.

При использовании формулы (7.8) класс точности обозначается в виде «0,02/0,01», где числитель – конкретное значение числа c , знаменатель – числа d . В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности определяют по более сложным формулам либо в виде графика или таблицы.

В стандартах или технических условиях на средство измерения указывается минимальное значение X_0 , начиная с которого применим принятый способ выражения пределов допускаемой относительной погрешности. Отношение X_k/X_0 называется *динамическим диапазоном измерения*.

Пример расчета пределов допустимой основной погрешности

Отсчет по равномерной шкале прибора с нулевой отметкой и предельным значением 50 А составил 25 А. Пренебрегая другими видами погрешностей, оценить пределы допускаемой абсолютной погрешности этого отсчета при условии, что класс точности прибора равен: 0,02/ 0,01; **0,5**; 0,5.

1. Для прибора с классом точности 0,02/0,01, согласно формуле (7.8), при $X = 25$ А, $X_k = 50$ А, $c = 0,02$, $d = 0,01$ (учитывая, что относительная погрешность выражается в процентах) получено:

$$\Delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{50A}{25A} - 1 \right) \right] \frac{25A}{100\%} = \pm 0,0075A.$$

2. Для прибора класса точности **0,5**:

$$\delta = \pm(100\%) / X; \quad \Delta = \pm 25A(0,5\%) / 100 = \pm 0,125A.$$

3. Для прибора класса точности 0,5, учитывая, что нормирующее значение X_N равно пределу измерения 50 А, получено:

$$\gamma = \pm(100\%) \Delta / X_N; \quad \Delta = \pm 50A(0,5\%) / 100 = \pm 0,25A.$$

Класс точности средства измерения: предел допускаемой дополнительной погрешности

Предел допускаемой дополнительной погрешности, вызванной изменением $\Delta\xi$, влияющей величины ξ , может быть найден с использованием функции влияния $\Psi(\xi)$:

$$\Delta_{ДСИ} = \pm \Delta\xi \cdot [d\Psi(\xi)/d\xi]_{\max}. \quad (7.9)$$

В частности, если $\Psi(\xi) = A\xi$, то $\Delta_{ДСИ} = \pm A\Delta\xi$.

Предел допускаемой дополнительной погрешности $\Delta_{ДСИ}$ может указываться в виде:

- постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;
- отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;
- зависимости предела $\Delta_{ДСИ}$ от влияющей величины (предельной функции влияния);
- функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Неметрологический и метрологический отказы средств измерений. Классификация метрологических отказов

В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры средства измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флюктуирующий

Глава 7. Метрологические характеристики средств измерительной техники

характер и приводят к **отказам**, то есть к невозможности средства измерения выполнять свои функции. Отказы делятся на неметрологические и метрологические.

Неметрологическим называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

Метрологическим называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапным называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, то есть по характеру проявления они являются явными. Особенностью внезапных отказов является постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности.

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля средства измерения.

Метрологическая надежность средств измерений

Способность средства измерения сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется **метрологической надежностью**. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности средства измерения позволяет ввести сколь угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования,

определенным степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Надежность средства измерения характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтопригодность (для восстанавливаемых средств измерений) и сохраняемость.

Стабильность средства измерения является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологические надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того процесса старения средства измерения. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его «внутреннее» свойство. Надежность, наоборот, является «внешним» свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

Безотказностью называется свойство средства измерения непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности средства измерения. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы средств измерений.

Долговечностью называется свойство средства измерения сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. *Работоспособное состояние* – это такое состояние средства измерения, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям. *Предельным* называется состояние средства измерения, при котором его применение недопустимо.

Ремонтопригодность – свойство средства измерения, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление средства измерения после

Глава 7. Метрологические характеристики средств измерительной техники

метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Процесс изменения МХ идет непрерывно независимо от того, используется ли средство измерения или оно хранится на складе. Свойство средств измерений сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и транспортирования называется *сохраняемостью*.

ГЛАВА 8

ЭТАЛОНЫ И ОБРАЗЦОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

8.1. Термины и определения

Эталон единицы физической величины – средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

- 1. Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений.
- 2. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя связанными друг с другом существенными признаками (по М. Ф. Маликову) – неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

- В случае, когда одним первичным эталоном технически нецелесообразно обслуживать весь диапазон измеряемой величины, создают несколько первичных эталонов, охватывающих части этого диапазона с таким расчетом, чтобы был охвачен весь диапазон. В этом случае проводят согласование размеров единиц, воспроизводимых «соседними» первичными эталонами.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Исходный эталон – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии), от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений.

➤ 1. Исходным эталоном в стране служит первичный эталон, исходным эталоном для республики, региона, министерства (ведомства) или предприятия может быть вторичный или рабочий эталон. Вторичный или рабочий эталон, являющийся исходным эталоном для министерства (ведомства) нередко называют *ведомственным эталоном*.

2. Эталоны, стоящие по поверочной схеме ниже исходного эталона, обычно называют *подчиненными эталонами*.

Государственный первичный эталон – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства.

➤ Государственные эталоны метра, килограмма, секунды, ампера, кельвина, канделя, ньютона, паскаля, вольта, беккереля.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

➤ 1. Термин *рабочий эталон* заменил собой термин *образцовое средство измерений* (ОСИ), что сделано в целях упорядочения терминологии и приближения ее к международной.

2. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды (1-й, 2-й, ..., n-й), как это было принято для ОСИ. В этом случае передачу размера единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передают рабочему средству измерений.

Национальный эталон – эталон, признанный официальным решением служить в качестве исходного для страны.

➤ Данное определение по существу совпадает с определением понятия *государственный эталон*. Это свидетельствует о том, что термины *государственный эталон* и *национальный эталон* отражают одно и то же понятие.

Вследствие этого термин *национальный эталон* применяют в случаях проведения *сличения эталонов*, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых *круговых сличений эталонов* ряда стран.

Международный эталон – эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

➤ Международный прототип килограмма, хранимый в МБМВ, утвержден 1-й Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ).

Одиночный эталон – эталон, в составе которого имеется одно средство измерений (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы.

Групповой эталон – эталон, в состав которого входит совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерений, применяемых совместно для повышения точности воспроизведения единицы или ее хранения.

➤ 1. Групповые эталоны подразделяют на *групповые эталоны постоянного или переменного составов*.

2. За результат измерений принимают обычно среднее арифметическое значение результатов измерений однотипными средствами измерений или эталонными установками.

Эталонный набор – эталон, состоящий из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и (или) хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств.

➤ Эталонные наборы создаются в тех случаях, когда необходимо охватить определенную область значений физической величины.

Эталонные разновесы (наборы эталонных гирь) и эталонные наборы ареометров.

Транспортируемый эталон – эталон (иногда специальной конструкции), предназначенный для его транспортирования к местам поверки (калибровки) средств измерений или сличений эталонов данной единицы.

Хранение эталона – совокупность операций, необходимых для поддержания метрологических характеристик эталона в установленных пределах.

➤ 1. При хранении первичного эталона выполняют регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

2. Для руководства работ по хранению государственных эталонов устанавливают специальную категорию должностных лиц – *ученых хранителей государственных эталонов*, назначаемых из числа ведущих в данной области специалистов-метрологов.

Эталонная база страны – совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющаяся основой обеспечения единства измерений в стране.

➤ Число эталонов не является постоянным, а изменяется в зависимости от потребностей экономики страны. Обычно прослеживается увеличение их числа во времени, что обусловлено постоянным развитием рабочих средств измерений.

Эталонная установка – измерительная установка, входящая в состав эталона.

➤ Эталон может состоять из нескольких эталонных установок.

В состав государственного первичного эталона единицы активности радионуклидов входит шесть эталонных установок.

Проверочная установка – измерительная установка, укомплектованная рабочими эталонами и предназначенная для поверки рабочих средств измерений и подчиненных рабочих эталонов.

Воспроизведение единицы физической величины – совокупность операций по материализации единицы физической величины с помощью государственного первичного эталона.

➤ Различают воспроизведение основных и производных единиц.

Воспроизведение основной единицы – воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы.

➤ 1. Воспроизведение единицы длины – метра – в соответствии с его определением, принятым на XVII ГКМВ в 1983 г., заключается в создании при помощи первичного эталона в специальных условиях длины пути, проходимого светом в вакууме за промежуток времени, равный 1/299792458 с. При этом скорость света в вакууме принята за константу (299792458 м/с).

2. Единица массы – 1 кг (точно) – воспроизведена в виде платиноиридиевой гири, хранимой в МБМВ в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное значение 1 кг, их действительные значения получены по отношению к международному эталону. На основании последних международных сличений платиноиридиевая гиря, входящая в состав государственного эталона единицы массы, в России имела значение 1,000000087 кг (1979 г.).

Воспроизведение производной единицы – определение значения физической величины в указанных единицах на основании измерений других величин, функционально связанных с измеряемой величиной.

➤ Воспроизведение единицы силы – ньютона – осуществляется на основании известного уравнения механики $F = mg$, где m – масса, g – ускорение свободного падения.

Передача размера единицы – приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизведимой или хранимой эталоном, осуществляющееся при их поверке (калибровке).

➤ 1. Нередко при поверке (калибровке) измеряют одну и ту же физическую величину поверяемым средством измерения и эталоном с целью установления разности в их показаниях и введения поправки (в показание поверяемого средства измерений).

2. Размер единицы передается «сверху вниз» в соответствии с числом ступеней передачи, установленным поверочной схемой.

На основании сопоставления показаний высокоточного угломерного прибора с показаниями эталона вводят поправки в каждое оцифрованное деление поверяемого прибора.

Хранение единицы – совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, присущего данному средству измерений.

Поверочная схема для средств измерений – нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче).

➤ Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема – поверочная схема, распространяющаяся на средства измерений данной физической величины, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации).

Ученый хранитель государственного эталона – должностное лицо государственного научного метрологического центра, несущее ответственность за правильное хранение и применение государственного эталона и его совершенствование.

8.2. Основные вопросы для изучения темы

Какие типы эталонов единиц физических величин существуют?

Эталоны специально классифицируют в зависимости от метрологического назначения (рис. 8.1) [5].

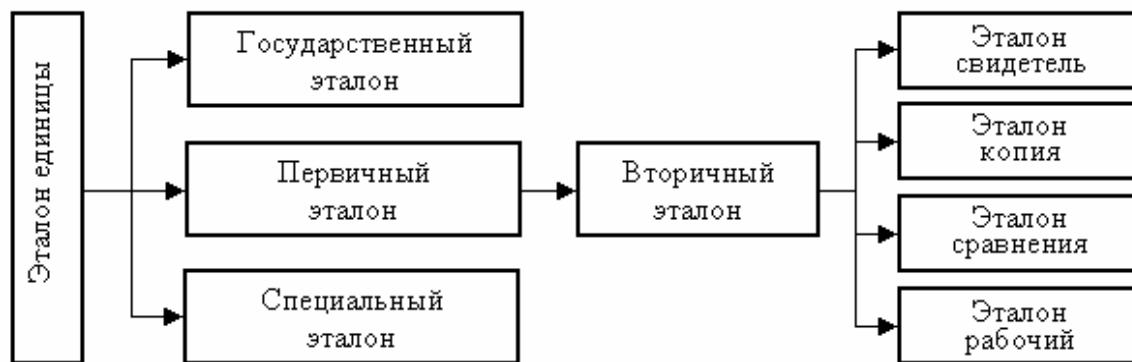


Рис. 8.1. Классификация эталонов

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью.

Специальный эталон служит для воспроизведения единицы в условиях, в которых первичный эталон не может использоваться и прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически неосуществима (например, на высоких и сверхвысоких частотах, в начале и конце участков диапазонов измерений и т.д.).

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве государственных. Все эталоны характеризуются неисключенной систематической погрешностью воспроизведения соответствующей единицы и относительным среднеквадратическим отклонением результата измерения размера этой единицы. Первая величина показывает точность эталона по отношению к принятому определению единицы и важна как для обеспечения правильности измерений, так и для их единства в международном масштабе. Вторая характеризует воспроизводимость эталоном размера единицы и является важнейшей характеристикой обеспечения единства измерений в стране.

Вторичный эталон — эталон, значение которого устанавливается по первичному эталону и он занимает подчиненное положение. Вторичные эталоны, в свою очередь, подразделяются на эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

Эталон-копия предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Благодаря этому первичный эталон разгружается от текущих работ по передаче размера единицы, что повышает срок его службы.

Эталон сравнения применяется для взаимного сличения эталонов, которые по тем или иным причинам нельзя непосредственно сравнивать друг с другом (например, международные сличения эталонов).

Рабочие эталоны являются наиболее распространенной категорией вторичных эталонов, и они предназначены для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений. Отметим, что рабочими называют такие средства, которые применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Как организуется передача размеров единиц от первичного эталона к рабочим?

На рис. 8.2 показана метрологическая последовательность передачи размеров единиц от первичного эталона рабочим, затем от рабочих эталонов – образцовым средствам измерений различных разрядов и далее рабочим мерам и измерительным приборам, то есть рабочим средствам измерений.

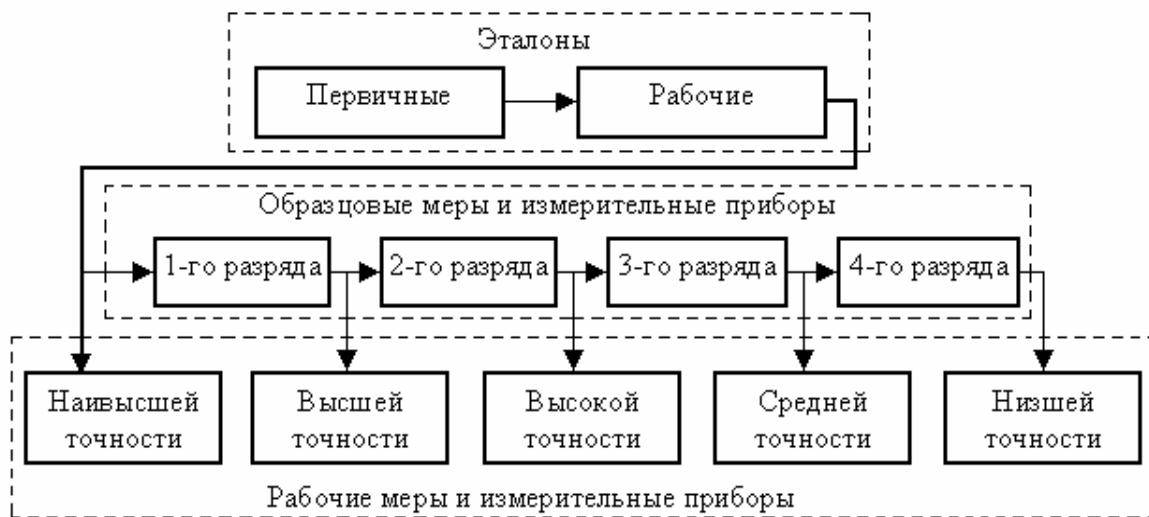


Рис. 8.2. Схема метрологической последовательности передачи размеров единиц

Что включает в себя эталонная база Российской Федерации?

Эталонная база включает государственные и специальные эталоны; первичные; вторичные эталоны: свидетели, копии, сличения, рабочие эталоны; образцовые меры и измерительные приборы (первого, второго, третьего и четвертого разрядов); а также рабочие меры и измерительные приборы.



С какой целью создаются эталоны? Что служит основанием для создания первичных и вторичных эталонов?

Эталоны создают для воспроизведения и хранения единиц физических величин и передачи их размера средствам измерений, применяемым в данной стране с целью обеспечения единства измерений.

Основаниями для создания первичных эталонов являются:

- широкое распространение образцовых и рабочих средств измерений, градуированных в данных единицах;
- целесообразность воспроизведения единицы в одном органе государственной метрологической службы;
- техническая возможность создания эталона и передачи размера единицы, воспроизводимой им, с необходимой точностью.

Основанием для создания вторичных эталонов является целесообразность:

- предохранения исходного эталона от преждевременного износа;
- наиболее рациональной организации поверочных работ;
- обеспечения сличений эталонов;
- контроля за неизменностью размера единицы, воспроизводимой исходным эталоном.



Основные свойства эталонов

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы физической величины (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующей техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличения и сами не претерпевают изменений в результате сличений.

?(?) Основная единица электрических величин и ее производные

Основной единицей электрических величин является единица силы тока – ампер (А). Производными от ампера единицами электрических величин являются:

- единица электродвижущей силы (эдс) и электрического напряжения – вольт (В);
- единица частоты – герц (Гц);
- единица электрического сопротивления – ом (Ом);
- единица индуктивности и взаимной индуктивности двух катушек – генри (Гн);
- единица электрической емкости – фарад (Ф).

?(?) Что представляет собой эталон единицы силы электрического тока?

Государственный первичный эталон ампера (регламентируется ГОСТ 8.022–91) – это комплекс средств измерений, в состав которого входят токовые весы и мера электрического сопротивления, применяемая при передаче размера ампера (эталон сравнения). С помощью токовых весов реализуется закон взаимодействия электрических токов – закон Ампера, положенный в основу определения ампера. В токовых весах, представляющих собой рычажные равноплечие весы, с одной стороны на коромысло действует сила взаимодействия двух соленоидов, один из которых подвижен и подвешен к этому коромыслу, с другой стороны – гиря известной массы. При протекании по этим катушкам постоянного тока возникает сила их взаимодействия, которая уравновешивается силой тяжести (например, массой гири).

При равновесии весов сила тока определяется массой гири, ускорением ее свободного падения в месте расположения весов, постоянной электродинамической системы (соленоидов), которая зависит от формы и размеров соленоидов, диаметра сечения

проводы соленоида, значения относительной магнитной проницаемости среды и т.п., то есть ампер воспроизводится через основные единицы – метр, секунду, килограмм.

Эталон ампера воспроизводит значение силы постоянного электрического тока и обеспечивает передачу размера ампера в диапазоне $10^{-12}...30$ А с относительным среднеквадратическим отклонением результата измерений не более $4 \cdot 10^{-6}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8 \cdot 10^{-6}$.



Государственные специальные эталоны единицы силы переменного тока

Для воспроизведения и хранения единицы силы переменного тока разработаны и утверждены два государственных специальных эталона.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот $40...10^5$ Гц и значений токов $0,01...10$ А состоит из набора компарирующих (от слова компаратор) термоэлектрических преобразователей, потенциометров постоянного тока, меры электродвижущей силы (нормального элемента), набора мер электрического сопротивления и стабилизованных источников постоянного и переменного токов. Данный эталон воспроизводит единицу силы тока с относительным среднеквадратическим отклонением не более 10^{-4} при относительной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-4}$.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот $0,1...300$ МГц и значений токов $3...100$ А (ГОСТ 8.132–74) включает электродинамический амперметр с двумя коаксиальными измерительными секциями, фотоэлектрический компаратор и измерительный трансформатор. Воспроизведение ампера осуществляется с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-4}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8,5 \cdot 10^{-4}$.



Эталон единицы электродвижущей силы и напряжения

Государственный первичный эталон вольта (регламентирован ГОСТ 8.027–2001) состоит из меры напряжения на основе эффекта Джозефсона (возникновение напряжения между двумя разделенными тонким слоем диэлектрика

сверхпроводниками, помещенными в высокочастотное электромагнитное поле), группы нормальных элементов и компараторов для сличения нормальных элементов между собой и с мерой напряжения. В состав вспомогательного оборудования входит комплект, состоящий из компьютера и устройств контроля температуры нормальных элементов, автоматической регистрации результатов измерений и контроля вольтамперных характеристик переходов Джозефсона. Таким образом, эталон базируется на стабильном эффекте Джозефсона и воспроизводит вольт абсолютным методом. Нормальные элементы, помещенные в термостат, обеспечивают хранение этой единицы. Первичный эталон вольта обеспечивает воспроизведение единицы эдс и электрического напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-8}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей 10^{-6} .

Государственные специальные эталоны единицы напряжения переменного тока

Для воспроизведения и хранения единицы напряжения переменного тока разработаны и утверждены два государственных специальных эталона.

Государственный первичный эталон напряжения переменного тока для значений 0,1...10 В в диапазоне частот 20...3·10⁷ Гц состоит из двух наборов термоэлектрических преобразователей напряжений, потенциометров постоянного тока, меры эдс, делителя напряжения и стабилизированных источников постоянного и переменного токов. Этalon воспроизводит единицу напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-5}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8 \cdot 10^{-4}$.

Эталон напряжения переменного тока для значений 0,1...1 В в диапазоне частот 30...3·10³ МГц включает в себя устройство формирования переменного напряжения, набор болометрических (терморезисторных) преобразователей постоянного и переменного напряжения, терморезисторный мост с автоматическим уравновешиванием, вольтметры, используемые в качестве компараторов переменного напряжения. Этalon воспроизводит единицу напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-3}$ при относительной аналитической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-2}$.

?

Эталон единицы электрического сопротивления

Государственный первичный эталон ома (ГОСТ 8.028–86) обеспечивает воспроизведение единицы электрического сопротивления со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 10^{-7} при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$. Единица электрического сопротивления – ом (Ом) входит в число производных единиц СИ. Эталон состоит из десяти манганиновых катушек сопротивления с номинальным значением 1 Ом и мостовой измерительной установки.

?

Что представляет собой эталон единицы электрической емкости?

Государственный первичный эталон электрической емкости (ГОСТ 8.371–80) представляет собой расчетный образцовый конденсатор, размещенный в вакуумном блоке, и емкостный мост, с помощью которого осуществляется передача размера единицы емкости на частоте 1 кГц.

Единица электрической емкости – фарад (Ф) входит в число производных единиц СИ. Эталон обеспечивает воспроизведение фараада со среднеквадратическим отклонением, не превышающим $2 \cdot 10^{-7}$ при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$. Для воспроизведения единицы емкости в более высокочастотном диапазоне (1...100 МГц) разработан и утвержден **государственный специальный эталон** (ГОСТ 8.267–77). В состав эталона входят четыре коаксиальных конденсатора и высокочастотный компаратор емкости мостового типа. Номинальное значение емкости воспроизводится эталоном со среднеквадратическим отклонением, не превышающим $3 \cdot 10^{-5}$ при систематической погрешности, не превышающей 10^{-4} .

?

Что представляет собой эталон единицы индуктивности?

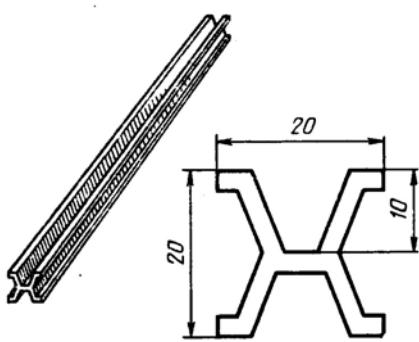
Государственный первичный эталон единицы индуктивности (ГОСТ 8.029–80) состоит из четырех тороидальных катушек индуктивностей и моста, с помощью которого осуществляется передача размера единицы индуктивности – генри (Гн) – на частоте 1 кГц со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 10^{-6} при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-6}$.



Примеры построения эталонов длины, массы, времени и частоты

В 1791 г. Национальное собрание Франции приняло длину десятимиллионной части четверти дуги парижского меридиана в качестве единицы длины – метра. В 1872 г. по инициативе Петербургской академии наук была создана международная комиссия, решившая не создавать уточненных эталонов метра, а принять в качестве исходной единицы длины «метр Архива» Франции.

В 1889 г. был изготовлен 31 эталон метра в виде платино-иридиевого стержня X-образного поперечного сечения (рис. 8.3) [3].



Как следует из рассмотрения рис. 8.3, эталон в виде линейки X-образного сечения вписывается в квадрат 20 на 20 мм. Длина линейки составляет 102 см. На каждом из ее концов нанесены три штриха на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Таким образом, расстояние между средними штрихами равно 1 м. Погрешность платино-иридиевых штриховых метров составляет $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ м.

Рис. 8.3. Эталон метра

В 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам было принято новое, уже упоминавшееся определение метра: метр – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2P_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Погрешность воспроизведения метра, оцениваемая среднеквадратическим отклонением результата измерения, с помощью данного эталона существенно уменьшилась по сравнению с погрешностью платиноиридиевого прототипа метра и составила $5 \cdot 10^{-9}$. Но такая погрешность в век ракетно-космической техники для многих потребителей оказывается слишком большой, и ученые искали пути создания эталона длины на других принципах.

Повышение точности эталона длины стало реальным при получении возможности распространения абсолютных измерений частоты (в радиочастотном спектре колебаний) на оптический диапазон и разработкой высокостабильных лазеров, что позволило уточнить значение скорости света. В 1983 г. XVII Генеральная конференция мер и весов приняла новое определение метра: «Метр – длина пути, проходимого в вакууме светом за $1/299792458$ доли секунды». Данное определение метра принципиально отличается от

определения 1960 г.: «криптоновый» метр не был непосредственно связан со временем, новый метр опирается на эталон единицы времени – секунду и известное значение скорости света.

В 1872 г. решением Международной комиссии по эталонам метрической системы за единицу массы была принята масса прототипа килограмма, хранящегося в Национальном архиве Франции. Этот прототип представляет собой платиновую цилиндрическую гирю высотой и диаметром 39 мм.

За международный прототип килограмма была принята платино-иридиевая гиря, наиболее близкая к массе платинового килограмма Архива. Следует отметить, что масса международного прототипа килограмма несколько отличается от массы кубического дециметра воды. В результате объем 1 литра воды и 1 кубического дециметра воды не равны друг другу ($1 \text{ л} = 1,000028 \text{ дм}^3$). В 1964 г. XII Генеральная конференция по мерам и весам решила приравнять $1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3$.

Международный прототип килограмма был утвержден на I Генеральной конференции по мерам и весам в 1889 г. как прототип единицы массы.

Погрешность воспроизведения килограмма, выраженная среднеквадратическим отклонением результата измерений, составляет $2 \cdot 10^{-9}$.

Эталон единицы времени и частоты соответствует определению единицы времени – секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями ($F = 4, m_F = 0$ и $F = 3, m_F = 0$) основного состояния атома цезия-133 в отсутствие внешних полей.

Воспроизведение секунды обеспечивается атомно-лучевым цезиевым стандартом частоты. Если отсутствует влияние внешних полей, прежде всего электрических и магнитных, частота излучения при переходе атома между двумя энергетическими уровнями E_2 и E_1 в соответствии с выражением $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$ очень стабильна и определяется внутренней структурой атома.

Основное состояние атома цезия расщеплено на два сверхтонких уровня (верхний $F = 4$ и нижний $F = 3$); при этом верхний уровень расщепляется на 9, а нижний – на 7 магнитных подуровней (рис. 8.4).

На уровнях $F = 4$ и $F = 3$ при подуровне $m_F = 0$ зависимость изменения частоты от индукции магнитного поля имеет вид

$$\nu = \nu_0 + 4,26 \cdot 10^6 B^2, \quad (8.1)$$

где $\nu_0 = 9192,631770 \cdot 10^6$ Гц – частота перехода при отсутствии магнитного поля ($m_F = 0$); B – магнитная индукция.

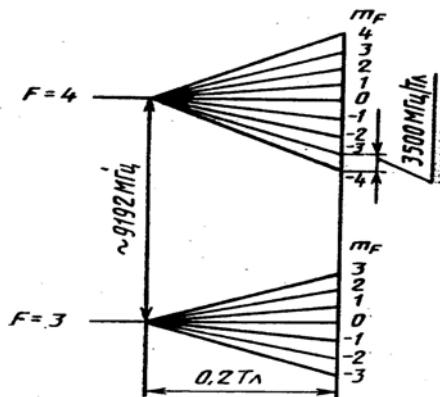


Рис. 8.4. Энергетические уровни атома цезия-133
в основном состоянии

Если магнитная индукция равна примерно $5 \cdot 10^{-6}$ Тл разностью между ν и ν_0 , то есть между частотой перехода при наличии и отсутствии магнитного поля, можно пренебречь. Если $B = 5 \cdot 10^{-6}$ Тл, частота отличается от соответствующего значения при нулевом поле всего на $1,8 \cdot 10^4$ Гц, и поэтому нетрудно отделить переходы, для которых $m_F = 0$, от переходов с $m_F = \pm 1$. Для этого достаточно на переменное магнитное поле наложить слабое однородное магнитное поле. Атомы цезия обладают небольшим магнитным моментом и поэтому взаимодействуют (отклоняются) в неоднородном магнитном поле. Таким образом, пропуская атомы цезия через неоднородное магнитное поле, можно отделить их состояния с уровнем $F = 3$ от состояний с уровнем $F = 4$.

Принцип действия эталона времени и частоты

Блок-схема эталона, одним из основных элементов которого является цезиевая атомно-лучевая трубка, представлена на рис. 8.5.

Источником радиочастотного сигнала в эталоне является кварцевый генератор. Но его суточная нестабильность частоты составляет около $\pm 1 \cdot 10^{-8}$. А нестабильность цезиевого пучка атомов на частоте перехода ($F = 4, m_F = 0, F = 3, m_F = 0$) достигает 10^{-13} .

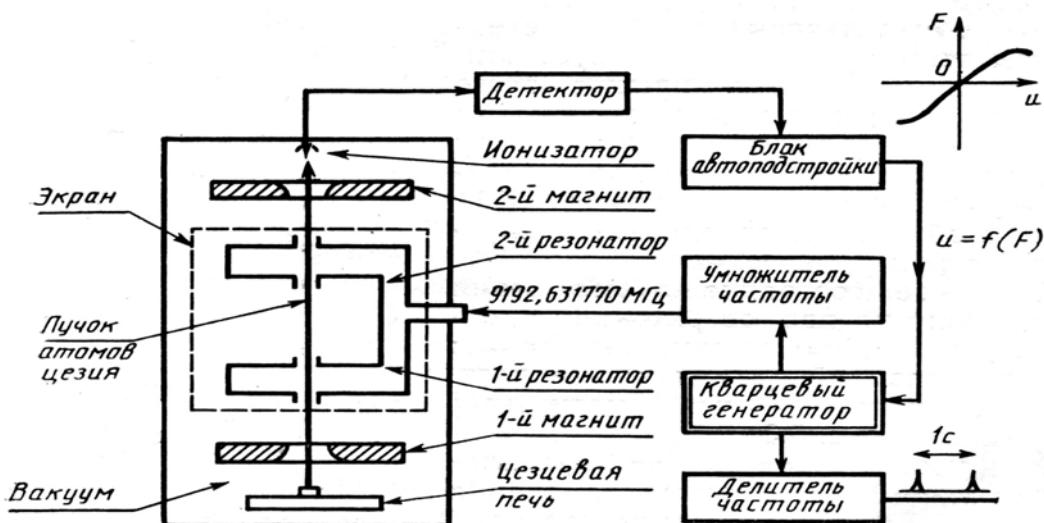


Рис. 8.5. Упрощенная схема эталона времени и частоты

Устройство эталона позволяет нестабильность высокочастотных электромагнитных колебаний кварцевого генератора довести до нестабильности цезиевого пучка.

Атомы цезия испаряются при температуре порядка 100 °C в цезиевой печи, с помощью коллиматора образуют узкий пучок (примерно 5 мм). Затем коллимированный пучок атомов цезия проходит между полюсами первого сортирующего (отклоняющего) магнита, поле которого неоднородно из-за специальной конфигурации полюсов. В поле первого магнита атомы цезия отклоняются и те из них, которые имеют энергетический уровень $F = 4$, $m_F = 0$, направляются к центру установки, где находится диафрагма (знаки магнитного момента для атомов цезия с уровнями $F = 4$, $m_F = 0$ и $F = 3$, $m_F = 0$ противоположны и это позволяет определить состояния с $F = 4$ от состояний с $F = 3$). При этом атомы проходят через первый высокочастотный резонатор, где действует переменное электромагнитное поле с частотой 9192,631770 МГц (высокочастотные колебания кварцевого генератора в умножителе преобразуются в такие колебания и подаются в оба высокочастотных резонатора). Таким образом, высокочастотное магнитное поле в резонаторе имеет частоту, соответствующую частоте перехода $F = 4$, $m_F = 0$, $F = 3$, $m_F = 0$. В области между резонаторами существует слабое однородное магнитное поле.

В резонаторах высокочастотное магнитное поле имеет энергию, достаточную для того, чтобы перевести часть атомов в состояние $F = 3$, $m_F = 0$. При этом атомы изменяют свой дипольный момент. После резонаторов пучок атомов цезия проходит через второй сортирующий магнит с неоднородным магнитным полем. Здесь атомы, перешедшие из состояния $F = 4$ в состояние $F = 3$, не

испытывают отклонения и попадают на детектор пучка. Те же атомы, которые не совершили этого перехода, отклоняются в сторону от детектора. Детектор представляет собой раскаленную вольфрамовую проволоку. Попадая на нее, нейтральные атомы цезия ионизируются, и проволока получает некоторый электрический заряд, соответствующий числу атомов, совершивших переход.

Если частота колебаний кварцевого генератора из-за его недостаточной стабильности изменилась, и, следовательно, частота колебаний высокочастотного поля отклонилась от частоты перехода, то атомы цезия не будут взаимодействовать с высокочастотным магнитным полем резонатора и, испытав в сортирующих магнитах дважды отклонения в одну и ту же сторону, не попадут на детектор пучка. Очевидно, чем ближе частота электромагнитного поля в резонаторах к частоте перехода атомов цезия, тем атомный пучок точнее приближается к оси атомно-лучевой трубы и тем больший заряд получает детектор пучка. Следовательно, число атомов, возвращенных к оси, определяемое по существу детектором пучка, является мерой ухода частоты кварцевого генератора.

В детекторе пучка ионы цезия ускоряются, поступают в электронный умножитель, входной ток которого является мерой числа атомов, совершивших переход. Ток на выходе детектора соответствует резонансной кривой с максимумом в точке, где частота СВЧ- поля в резонаторах равна частоте перехода атомов цезия. Затем происходит выделение напряжения положительной и отрицательной полярности в зависимости от того, увеличилась или уменьшилась частота кварцевого генератора относительно частоты перехода. Величина этого напряжения определяется степенью расстройки частоты кварцевого генератора. Напряжение с выхода детектора с частотой F_d в системе автоподстройки преобразуется в напряжение положительной или отрицательной полярности. Это электрическое напряжение поступает на кварцевый генератор и «подстраивает» его до тех пор, пока частота СВЧ- поля резонаторов не станет равной частоте перехода атомов цезия.

В российском государственном эталоне времени и частоты нестабильность цезиевой атомно-лучевой трубы составляет $1 \cdot 10^{-13}$.

Государственный эталон времени и частоты является основным, уникальным техническим устройством Государственной службы времени и частоты, обеспечивающей формирование и хранение шкал времени нашей страны и международной шкалы атомного времени ТАI, передачу с заданной точностью эталонных сигналов времени и частоты по радио и телевизионным каналам, сличение с вторичными эталонами с помощью перевозимых квантовых (цезиевых) часов, причем погрешность сличения при времени транспортирования от одних до пяти суток составляет (0,03 ... 0,1) мкс.

Расширение диапазона измеряемых с помощью эталона частоты на оптический диапазон спектра позволяет обеспечить единство и точность прямых измерений частоты вплоть до частоты 10^{14} Гц (100 ТГц).

Принцип действия токовых весов

В соответствии с определением единицы силы тока эталон должен быть основан на измерении силы взаимодействия двух прямолинейных проводников бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 м один от другого в вакууме. При силе электрического тока в проводниках 1 А сила взаимодействия составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Данное определение длительное время реализовалось с помощью токовых весов, включающих подвижную и неподвижную токонесущие катушки и высокочастотные равноплечие рычажные весы, к одному из плеч которых присоединена подвижная катушка, к другому – «чашка» с уравновешивающим грузом (рис. 8.6).

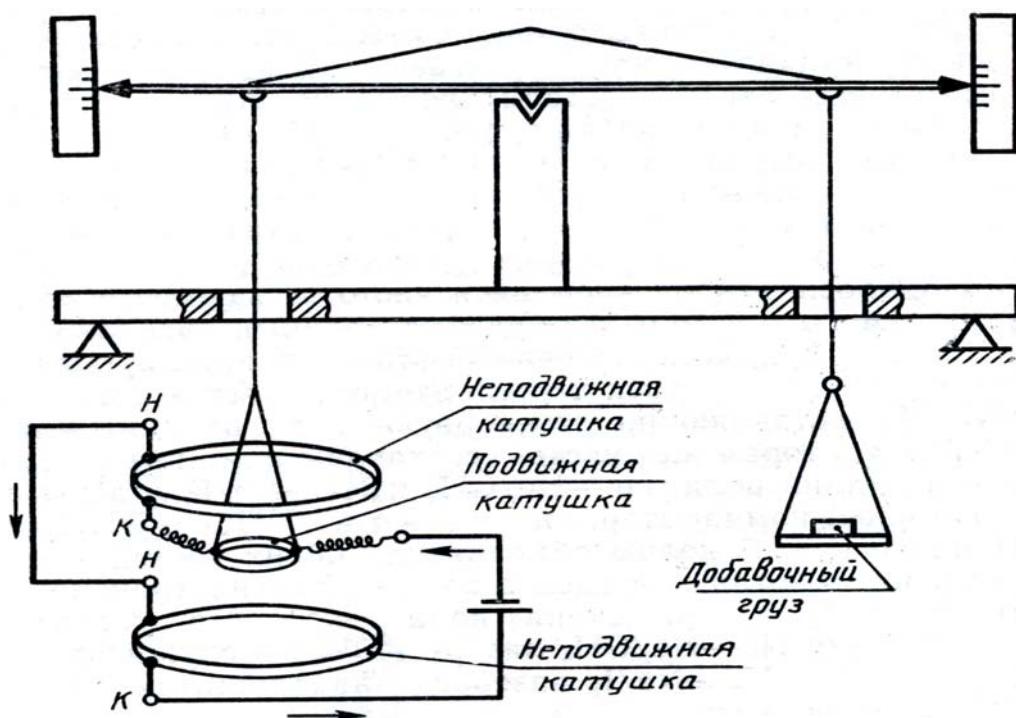


Рис. 8.6. Схема устройства токовых весов

Взаимодействие подвижной и неподвижной катушек, соединенных последовательно, при протекании по ним постоянного электрического тока создает силу, которая вызывает отклонение левого плеча коромысла токовых весов. Эта сила уравновешивается грузом (набор гирь), помещенным на первой «чашке» весов. Взаимодействие токов определяется по закону Ампера:

$$F_1 = kI_1I_2, \quad (8.2)$$

где F_1 – сила взаимодействия токов в подвижной и неподвижной катушках; I_1 и I_2 – сила электрического тока в подвижной и неподвижной катушках; k – постоянная электродинамическая система весов, зависящая от формы и размеров катушек, диаметра сечения проводов катушек, магнитной проницаемости сред и т. д.

В связи с последовательным соединением катушек токи в них одинаковы ($I_1 = I_2$).

Уравновешивающая сила тяжести, определяющая положение правой «чашки» весов, равна $F_2 = mg$, где m – масса добавочного груза; g – ускорение свободного падения в месте расположения весов.

При равновесном положении токовых весов, когда $F_1 = F_2$, сила тока должна иметь значение

$$I = \sqrt{(mg/k)}, \quad (8.3)$$

где k – постоянная электродинамической системы, с размерностью $\text{LMT}^{-2}\text{I}^{-2}$.

Таким образом, можно определить силу электрического тока в зависимости от массы добавочного груза.

Какие способы воспроизведения размера единицы силы тока реализованы в государственном первичном эталоне?

В 1992 г. в качестве государственного первичного эталона силы постоянного электрического тока в диапазоне $10^{-16} \dots 30$ А утвержден эталон, позволяющий значительно повысить точность воспроизведения и передачи размера единицы силы электрического тока. Новый эталон ампера состоит из двух комплексов. В первом используется способ воспроизведения размера единицы силы тока (1 мА и 1 А) с использованием косвенных измерений силы тока $I = U/r$, причем размер единицы U электрического напряжения – вольт – воспроизводится с помощью квантового эффекта Джозефсона, а размер единицы r электрического сопротивления – ом – с помощью квантового эффекта Холла.

Второй комплекс воспроизводит силу постоянного тока в диапазоне $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А. Его основу составляет многозначная мера силы тока, включающая меру линейно измеряющегося электрического напряжения с набором герметизированных конденсаторов (C_0), прибора для измерения напряжения (U_d), прибора для измерения времени (T_d) и компенсирующего (сравнивающего) устройства.

При воспроизведении размеров единицы силы тока последний определяется по формуле

$$I_0 = U_d(C_0 / T_d). \quad (8.4)$$

Воспользовавшись размерностями электрического напряжения и емкости:

$$\dim U = [P]/[I] = L^2 M T^{-3} I^{-1},$$

$$\dim C = [Q]/[U] = T I / L^2 M T^{-3} I^{-1} = L^{-2} M^{-1} T^4 I^2,$$

убедимся, что выражение для силы тока $I_0 = U_d (C_0 / T_d)$ имеет требуемую размерность:

$$\dim I_0 = L^2 M T^{-3} I^{-1} (L^{-2} M^{-1} T^4 I^2 / T) = I.$$

При компенсировании токов производится компенсация электрического заряда, образуемого на одной из пластин измеряемым (калибруемым) током I_x , зарядом, создаваемым на другой пластине конденсатора эталонным током I_0 . При равенстве зарядов $I_x = I_0$ таким образом калибруемому источнику тока передан размер единицы эталонного источника тока I_0 .

Погрешности государственного эталона единицы силы электрического тока в зависимости от воспроизводимой величины приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Диапазон воспроизведения, А	Среднее квадратическое отклонение результата измерения, А	Неисключенная систематическая погрешность, А
1,0	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Схема эталона для воспроизведения единицы температуры Кельвина

На рис. 8.7 показана схема исходного эталона единицы температуры – кельвина. Внутрь защищенной от внешних источников тепла камеры помещается сосуд (ампула) для образования тройной точки воды. Внутрь камеры загружается лед (ледяная крошка). В результате длительного воздействия льда и воды в той области ампулы, которая соприкасается с ледяной крошкой, образуется слой льда, а на внутренней области ампулы, в центре которой имеется цилиндрическая полость для помещения термометра, остается очень тонкий слой воды. В верхней части ампулы вода находится в парообразном состоянии.

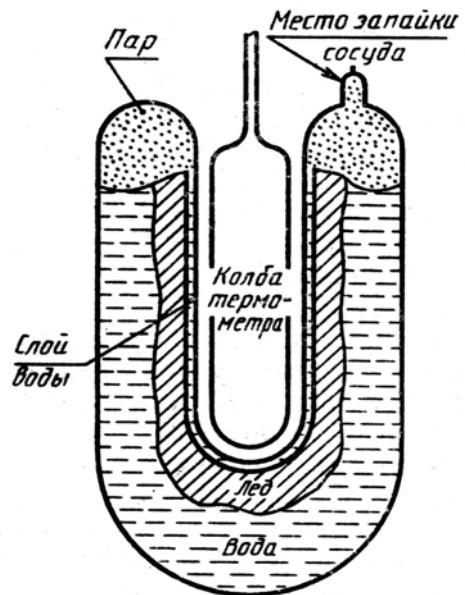


Рис. 8.7. Схема эталона для воспроизведения единицы температуры Кельвина

Таким образом, воспроизводится тройная точка воды. В качестве термометра, регистрирующего состояние тройной точки воды, применяется газовый термометр, представляющий замкнутый объем, снабженный главным манометром и точным ртутным манометром для измерения давления газа. Температура с помощью газового термометра в первом приближении определяется по формуле

$$PV=RT \text{ (для идеального газа),}$$

где P и V – давление и объем термометра с газом; R – газовая постоянная.

Метрологические характеристики государственного первичного эталона

Государственный первичный эталон в диапазоне температур 0,8...303 К хранится в НПО «ВНИИФТРИ». Этalon имеет ряд измерительных установок: в диапазонах 0,8...4,2 К, 4,2...13,81 К и выше. В диапазоне измерений 0,8...4,2 К этalon имеет высокие метрологические характеристики: СКО не хуже 0,0006 К, неисключенная систематическая погрешность 0,001 К. В диапазоне измерений 4,2...13,81 К значение среднеквадратического отклонения результатов наблюдений составляет 0,0005 К, неисключенная систематическая погрешность не хуже 0,003 К. Для наилучшего приближения к термодинамической температурной шкале в указанных диапазонах измерений используется газовый термометр. В эталонных установках, воспроизводящих температуру выше 13,81 К, используются платиновые термометры сопротивления.



Обоснование целесообразности построения термодинамической шкалы

В свое время Кельвин и позже Д. И. Менделеев обосновали целесообразность построения термодинамической шкалы температуры по одной реперной точке, поскольку такая шкала позволяет определять абсолютную температуру точнее, чем в случае шкалы с двумя реперными точками. В первом случае определенное числовое значение приписывается только одной экспериментально получаемой точке шкалы. При этом тройная точка воды может быть воспроизведена с погрешностью не хуже $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть с наивысшей точностью, полученной при измерении температуры. Это тепловое равновесие воды в твердой, жидкой и газообразной фазах и использовано для построения исходного эталона температуры.

В определение единицы термодинамической температуры «заложено» взаимодействие различных состояний воды, находящихся в термодинамическом равновесии: кельвин – $1/273,16$ часть температуры тройной точки воды. Это определение позволяет построить термодинамическую температурную шкалу.

Особенность температуры состоит также в том, что она является неаддитивной физической величиной.

Для температуры воспроизведение одной эталонной точки не позволит точно устанавливать другие температурные точки. Таким образом, измерение температуры требует осуществить точное воспроизведение многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу. Температуры, определяемые по этой шкале, должны максимально совпадать с термодинамической шкалой температуры Кельвина. Носителями шкалы Кельвина в основном являются термометры сопротивления, градуированные по результатам предельно точных измерений термодинамических температур, полученных и сопоставленных в ведущих термометрических лабораториях мира.

Сформулированным требованиям на современном этапе термометрических исследований отвечает Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90). При этом основной реперной точкой шкалы остается кельвин, воспроизводимый в тройной точке воды. Эталон, воспроизводящий размер кельвина, очевидно, был и остается основным «держателем» единицы температуры.



Принятым в 1993 г. постановлением Госстандарта России температурная шкала МТШ-90 поддерживается двумя государственными первичными эталонами единицы температуры. Государственный эталон единицы температуры в диапазоне $0\text{...}2500\text{ }^{\circ}\text{C}$

представляет комплекс эталонов, включающий эталон кельвина, установку для воспроизведения реперных точек затвердевания цинка, серебра, золота и др., а также интерполяционных приборов – платиновых термометров сопротивления и термоэлектрических термометров. Для измерения температуры тройной точки воды используется газовый термометр. Погрешность воспроизведения кельвина (СКО результата наблюдений) составляет 0,0002...1,5 К (нижнее значение погрешности соответствует воспроизведению температуры тройной точки воды). Неисключенная составляющая систематической погрешности оценивается значениями 0,0001...0,5 К (нижнее значение соответствует воспроизведению температуры тройной точки воды).

При введении новой температурной шкалы достигается ряд усовершенствований измерений температуры: повышается точность измерений, действие МТШ-90 расширяется в области низких температур от 13,8 К до 0,65 К, новая шкала, в отличие от МПТШ-68 достаточно «гладкая» в результате использования платинового термометра сопротивления в качестве интерполяционного прибора в диапазоне от 13,8 К до 1235 К. Вместе с тем МТШ-90 сохраняет принцип построения шкалы на основе реперных точек с приписанными им новыми значениями температур.

Для чего предназначена поверочная схема? Какие виды поверочных схем существуют?

Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством проверочных схем. Проверочные схемы делятся на государственные и локальные [4].

Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

Локальная поверочная схема распространяется на средства измерений данной физической величины, применяемые в данном регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (организации).

Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для средств измерений одних и тех же физических величин. Они могут быть составлены при отсутствии государственной поверочной схемы. В них допускается указывать конкретные типы (экземпляры) средств измерений.

Локальные поверочные схемы оформляют в виде чертежа, элементы которого приведены на рис. 8.8.

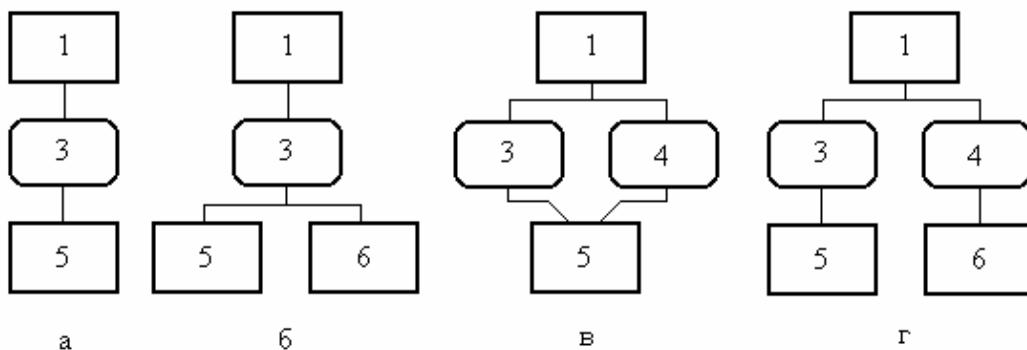


Рис. 8.8. Элементы графического изображения поверочных схем при передаче размера:

- (а) – от эталона 1 к объекту 5 методом 3; (б) – от эталона 1 к объектам поверки 5 и 6 методом 3; (в) – от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 или 4; (г) – от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 и объекту поверки 6 методом 4

Поверочная схема устанавливает передачу размера единиц одной или нескольких взаимосвязанных величин. Она должна включать не менее двух ступеней передачи размера. Поверочную схему для средств измерений одной и той же величины, существенно отличающихся по диапазонам измерений, условиям применения и методам поверки, а также для средств измерений нескольких физических величин допускается подразделять на части. На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

- наименования средств измерений и методов поверки;
- номинальные значения физических величин или их диапазоны;
- допускаемые значения погрешностей средств измерений;
- допускаемые значения погрешностей методов поверки.

ГЛАВА 9

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

9.1. Термины и определения

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

Обеспечение единства измерений – деятельность метрологических служб, направленная на достижение и поддержание единства измерений в соответствии с законодательными актами, а также правилами и нормами, установленными государственными стандартами и другими нормативными документами по обеспечению единства измерений.

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) – комплекс нормативных документов межрегионального и межотраслевого уровней, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в стране (при требуемой точности), утверждаемых Госстандартом страны.

➤ В ГСИ выделяются основополагающие стандарты, устанавливающие общие требования, правила и нормы, а также стандарты, охватывающие какую-либо область или вид измерений.

Метрологическая служба – служба, создаваемая в соответствии с законодательством для выполнения работ по обеспечению единства

Глава 9. Метрологическая служба

измерений и для осуществления метрологического контроля и надзора.

➤ 1. Различают *государственную метрологическую службу, метрологические службы государственных органов управления, метрологические службы юридических лиц*.

2. Имеются также иные *государственные службы обеспечения единства измерений*, которые осуществляют межрегиональную и межотраслевую координацию работ по ОЕИ в закрепленных видах деятельности. Руководство этими службами осуществляется Госстандартом страны. К ним относятся: *Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли* (ГСВЧ); *Государственная служба стандартных образцов* (ГССО); *Государственная служба стандартных справочных данных* (ГСССД).

Государственная метрологическая служба – метрологическая служба, выполняющая работы по обеспечению единства измерений в стране на межрегиональном и межотраслевом уровне и осуществляющая государственный метрологический контроль и надзор.

➤ Государственная метрологическая служба находится в ведении Госстандарта страны и включает: государственные научные метрологические центры; органы государственной метрологической службы на территориях субъектов страны.

Государственный метрологический контроль – деятельность, осуществляемая государственной метрологической службой по утверждению типа средств измерений, поверке средств измерений (включая рабочие эталоны), по лицензированию деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений.

➤ *Лицензия на изготовление (ремонт, продажу, прокат) средств измерений* представляет собой документ, удостоверяющий право заниматься указанными видами деятельности и выдаваемый органом государственной метрологической службы.

Государственный метрологический надзор – деятельность, осуществляемая органами государственной метрологической службы по надзору за выпуском, состоянием и применением средств измерений (включая рабочие эталоны), за аттестованными методиками измерений, соблюдением метрологических правил и норм, за количеством товаров при продаже, а также за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже.

Испытания средств измерений – обязательные испытания образцов средств измерений в сферах распространения

государственного метрологического контроля и надзора с целью утверждения типа средств измерений.

➤ 1. Испытания средств измерений проводят государственные научные метрологические центры, аккредитованные Госстандартом страны в качестве государственных центров испытаний средств измерений.

2. Решением Госстандарта страны в качестве государственных центров испытаний средств измерений могут быть аккредитованы и другие специализированные организации.

3. Ранее применялся термин *государственные испытания средств измерений* и производные от него термины: *государственные приемочные испытания* и *государственные контрольные испытания*.

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

➤ 1. Проверку исходных эталонов органов государственной метрологической службы и уникальных средств измерений (которые не могут быть поверены этими органами) осуществляют ГНМЦ (по специализации).

2. Проверке подвергают средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору.

3. При поверке используют эталон. Проверку проводят в соответствии с обязательными требованиями, установленными нормативными документами по поверке. Проверку проводят специально обученные специалисты, аттестованные в качестве поверителей органами Государственной метрологической службы.

4. Результаты поверки средств измерений, признанных годными к применению, оформляют выдачей *свидетельства о поверке*, нанесением *проверительного клейма* или иными способами, установленными нормативными документами по поверке.

5. Другими официально уполномоченными органами, которым может быть предоставлено право проведения поверки, являются аккредитованные метрологические службы юридических лиц. *Аkkредитация на право поверки средств измерений* проводится уполномоченным на то государственным органом управления.

Первичная поверка средств измерений – поверка, выполняемая при выпуске средства измерений из производства или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы партиями, при продаже.

Периодическая поверка средств измерений – поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межпроверочные интервалы времени.

➤ *Межпроверочные интервалы* для периодической поверки устанавливаются нормативными документами по поверке в зависимости от

Глава 9. Метрологическая служба

стабильности того или иного средства измерений и могут устанавливаться от нескольких месяцев до нескольких лет.

Внеочередная поверка средств измерений – поверка средства измерений, проводимая до наступления срока его очередной периодической поверки.

➤ Необходимость внеочередной поверки может возникнуть вследствие разных причин: ухудшение метрологических свойств средства измерений или подозрение в этом, нарушение условий эксплуатации, нарушение поверительного клейма и др.

Калибровка средств измерений – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений.

➤ 1. Калибровке могут подвергаться средства измерений, не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору.

2. Результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые средством измерений, или поправки к его показаниям, или оценить погрешность этих средств. При калибровке могут быть *определены и другие метрологические характеристики*.

3. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются *калибровочным знаком*, наносимым на средства измерений, или *сертификатом о калибровке*, а также записью в эксплуатационных документах. Сертификат о калибровке представляет собой документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается организацией, осуществляющей калибровку.

Градуировка средства измерений – определение градуировочной характеристики средства измерений.

Метрологическая аттестация средств измерений – признание метрологической службой узаконенным для применения средства измерений единичного производства (или ввозимого единичными экземплярами из-за границы) на основании тщательных исследований его свойств.

➤ Метрологической аттестации могут подлежать средства измерений, не подпадающие под сферы распространения государственного метрологического контроля или надзора.

Нормативные документы по обеспечению единства измерений – государственные стандарты, международные (региональные) стандарты, правила, положения инструкции и рекомендации, содержащие нормы и требования по обеспечению единства измерений.

9.2. Основные вопросы для изучения темы



В чем заключается единство измерений?

Понятие **«единство измерений»** довольно емкое. Оно охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц физических величин, разработку систем воспроизведения величин и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и ряд других вопросов.

Единство измерений должно обеспечиваться при любой точности, необходимой науке и технике. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность Государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными правилами, требованиями и нормами. На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) или Нормативными документами органов метрологической службы.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие средства измерений одной и той же величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения в специализированных учреждениях установленных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерений.



Что такое поверка средств измерений? Какими способами она может производиться?

Поверка – это операция, проводимая уполномоченным органом и заключающаяся в установлении пригодности средства измерения к применению на основании экспериментально определенных метрологических характеристик и контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основной метрологической характеристикой, определяемой при поверке средства измерения, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого средства измерения с более точным – рабочим эталоном. Различают поверки: первичную, периодическую, внеочередную, инспекционную, комплексную, поэлементную и выборочную.

Поверка выполняется метрологическими службами, которым дано на это право. Средство измерений, признанное годным к применению, оформляется выдачей свидетельства о поверке,

нанесением поверительного клейма или иными способами, устанавливаемыми нормативно-техническими документами.

В ряде случаев поверку называют градуировкой. *Градуировка* – нанесение отметок на шкалу, соответствующих показаниям образцового средства измерения или определение по его показаниям уточненных значений величины, соответствующих нанесенным отметкам на шкале рабочего средства измерения.

Проверка измерительных приборов проводится одним из двух методов:

- 1) непосредственного сравнения измеряемых величин и величин, воспроизводимых образцовыми мерами соответствующего класса точности;
- 2) непосредственного сличения показаний поверяемого и некоторого образцового прибора при измерении одной и той же величины. Основой данного метода служит одновременное измерение одного и того же значения физической величины поверяемым и образцовым средствами измерений. Разность показаний этих приборов равна абсолютной погрешности поверяемого средства измерений.

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями образцового и поверяемого средств измерений. Обычно, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений, это соотношение принимается равным 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности). Если же поправки не вводят, то образцовые средства измерений выбираются из соотношения 1:5.

Для чего используются стандартные образцы? Их метрологические характеристики

Для ряда областей измерений, и в первую очередь для физико-химических измерений, чрезвычайно перспективным средством повышения эффективности поверочных работ является применение **стандартных образцов** (СО). *Стандартный образец состава и свойств веществ и материалов* – это средство измерений в виде вещества (материала), состав или свойства которого установлены аттестацией. Можно дать и другое определение: стандартный образец – образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующими свойство или состав этого вещества (материала) [4].

Стандартные образцы предназначены для обеспечения единства и требуемой точности измерений посредством:

- градуировки, метрологической аттестации и поверки средств измерений;
- метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- контроля показателей точности измерений;
- измерения физических величин, характеризующих состав или свойства веществ материалов, методами сравнения.

По своему назначению СО исполняют роль мер, однако в отличие от «классических» мер они имеют ряд особенностей. Например, образцы состава воспроизводят значения физических величин, характеризующих состав или свойства именно того материала (вещества), из которого они изготовлены. Стандартные образцы, как правило, не являются изделиями, они реализованы обычно в виде части или порции однородного вещества (материала), причем эта часть является полноценным носителем воспроизводимой единицы физической величины, а не ее части. Эта особенность образцов отражена в требованиях к их однородности по составу и свойствам. Однородность материала, из которого сделан образец, имеет принципиальное значение, в то время как для меры такая характеристика часто является второстепенной.

Стандартные образцы состава и свойств в отличие от мер характеризуются значительным влиянием неинформативных параметров (примесей, структуры материала и др.). При использовании СО очень часто необходимо учитывать функции влияния таких параметров.

В зависимости от сферы действия и области применения определяется уровень утверждения стандартных образцов. По этому признаку они делятся на государственные, отраслевые и стандартные образцы предприятий. Тем СО, которые включены в поверочные схемы, присваивают разряды.

Стандартные образцы объединяются в типы. *Typ* – это классификационная группировка образцов, определяющими признаками которых являются одно и то же вещество, из которого они изготовлены, и единая документация, по которой они выполнены. Типы СО допускаются к применению при условии их утверждения и регистрации в соответствующем реестре. Для каждого типа СО при их аттестации устанавливается срок действия (не более 10 лет) и определяются **метрологические характеристики**, которые нормируются в документации на их разработку и выпуск. К ним относятся:

- аттестованное значение – значение аттестованной характеристики образца, им воспроизводимое, установленное при его аттестации и приводимое в свидетельстве с указанием погрешности;

- погрешность аттестованного значения – разность между аттестованным и истинным значениями величины, воспроизводимой той частью образца, которая используется при измерении;
- характеристика однородности – характеристика свойства образца, выражающегося в постоянстве значения величины, воспроизводимой его различными частями, используемыми при измерениях;
- характеристика стабильности – характеристика свойства образца сохранять значения метрологических характеристик в установленных пределах в течение указанного в свидетельстве срока годности при соблюдении заданных условий хранения и применения;
- функции влияния – зависимость метрологических характеристик образца от изменения внешних влияющих величин в заданных условиях применения.



Межповерочные интервалы

Одной из основных форм поддержания средства измерения в метрологически исправном состоянии является его периодическая поверка. Она проводится метрологическими службами согласно правилам, изложенным в специальной нормативно-технической документации. Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности средства измерения. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы времени, называемые **межповерочными интервалами** (МПИ).

Момент наступления метрологического отказа может выявить только поверка средства измерения, результаты которой позволяют утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие – могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для средств измерений, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Значения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 6 K месяцев, где K – целое положительное число. Для средств измерений, у которых изменение МХ является следствием износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирается МХ, определяющая состояние метрологической исправности средства измерений. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько МХ, то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках.

В настоящее время существуют три основных пути определения продолжительности МПИ:

- на основе статистики отказов;
- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы средства измерения.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности средства измерения. Первый способ является эффективным при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени МХ средств измерений. При известных параметрах моделей МПИ определяется моментом выхода погрешности за нормируемый для данного средства измерения допуск. Однако большой разброс параметров и характеристик процессов старения средства измерения приводит к большой погрешности расчета МПИ с помощью таких моделей.

Применение методов расчета МПИ, основанных на статистике скрытых и явных отказов, требует наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ средств измерений различных типов. Такого рода исследования весьма трудоемки и занимают значительное время. Этим объясняется тот факт, что опубликованных статистических данных о процессах старения приборов различных типов крайне мало. В технических описаниях средств измерений, как правило, приводится средняя наработка до отказа, средний или гамма-процентный ресурс и срок службы. Этого явно недостаточно для расчета МПИ.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию средства измерения и устранять последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта средства измерения, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и от использования метрологически неисправного прибора. Основная сложность применения этого метода состоит в следующем. Затраты на

ремонт и поверку средства измерения достаточно легко определяются по нормативным документам. В отличие от них потери из-за использования приборов со скрытым метрологическим отказом на практике, как правило, неизвестны. Приходится прибегать к приближенным моделям, описывающим затраты на эксплуатацию средства измерения со скрытыми метрологическими отказами в виде функции потерь того или иного вида.

Наиболее универсальным является метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначается первоначальный интервал, а результаты последующих поверок являются исходными для его корректировки.

Основной трудностью данного метода является назначение первого МПИ. Преодолеть ее возможно тремя путями. Во-первых, для определения протяженности первого МПИ могут быть использованы показатели метрологической надежности поверяемого средства измерения. Во-вторых, длительность первого интервала может быть оценена исходя из анализа данных по эксплуатации аналогичных поверяемому по конструкции и технологии производства средств измерений. В-третьих, первый МПИ выбирается в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб.

Последующие значения МПИ определяются путем корректировки первого интервала с учетом результатов проведенных поверок большого числа однотипных средств измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идея разработки учебного пособия в форме вопросов и ответов вызвана необходимостью метрологической подготовки специалистов в различных областях науки и техники.

В учебном пособии предложен перечень вопросов и ответов, которые охватывают практически все разделы теоретической метрологии, без знания которых невозможно решить задачи правильного выбора методов и средств измерений, осуществить обработку и выдачу результатов измерений с учетом современных требований и нормативных документов.

Приведенные термины и определения, зафиксированные в государственных, европейских и международных стандартах, позволяют повысить уровень технической образованности, что создает хорошую базу для совершенствования знаний в области прикладной и теоретической метрологии.

Авторы надеются, что учебное пособие будет полезно студентам, магистрантам и аспирантам для обучения, а также может быть использовано в качестве справочного и разъяснительного материала по метрологии.

Список сокращений

- ✓ **АЦП** – аналого-цифровой преобразователь
- ✓ **ГКМВ** – Генеральная конвенция по мерам и весам
- ✓ **ИВК** – измерительно-вычислительный комплекс
- ✓ **ИИС** – информационно-измерительная система
- ✓ **ИП** – измерительный преобразователь
- ✓ **МБМВ** – Международное Бюро Мер и Весов
- ✓ **МПИ** – межпроверочный интервал
- ✓ **МТШ** – Международная температурная шкала
- ✓ **МХ** – метрологическая характеристика
- ✓ **НПС** – неисключенные систематические погрешности
- ✓ **ПО** – программное обеспечение
- ✓ **СКО** – среднеквадратическое отклонение
- ✓ **СО** – стандартный образец
- ✓ **ЦАП** – цифроаналоговый преобразователь

АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсолютная погрешность измерения **65**
Абсолютная погрешность измерительного прибора **72**
Абсолютная погрешность средства измерений **71**
Абсолютное значение погрешности **65**
Абсолютное измерение **43**
Автоматизированное средство измерений **99**
Автоматическое средство измерений **99**
Аддитивная физическая величина **8**

Безразмерная физическая величина **7**
Бесконтактный метод измерений **47**

Вариация показаний измерительного прибора **125**
Вес результата измерений **48**
Вид измерений **45**
Вид средства измерений **127**
Влияющая физическая величина **6**
Внеочередная поверка средств измерений **179**
Внесистемная единица физической величины **22**
Воспроизведение единицы физической величины **155**
Воспроизведение основной единицы **155**
Воспроизведение производной единицы **155**

Воспроизводимость результатов измерений **64**
Вспомогательное средство измерений **99**
Вторичный эталон **153**

Государственная метрологическая служба **177**
Государственная поверочная схема **156**
Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) **176**
Государственный метрологический контроль **177**
Государственный метрологический надзор **177**
Государственный первичный эталон **153**
Градуировка средства измерений **179**
Градуировочная характеристика средства измерения **126**
Групповой эталон **154**

Датчик **102**
Действительное значение меры **135**
Действительное значение физической величины **6**
Деление шкалы **104**
Диапазон измерений средства измерений **126**
Диапазон показаний средства измерений **125**
Динамическая погрешность измерений **70**

- Динамическая погрешность
средства измерений **72**
Динамическое измерение **43**
Дифференциальный метод **46**
Длина шкалы **104**
Доверительные границы
погрешности результата
измерения **68**
Дольная единица физической
величины **22**
Дополнительная единица
системы физических величин
21
Дополнительная погрешность
средства измерений **72**

Единица измерения
физической величины **21**
Единство измерений **176**

Значение физической величины
5
Зона нечувствительности
средства измерений **127**

Измерение физической
величины **42**
Измерительная задача **45**
Измерительная информация **45**
Измерительная система **101**
Измерительная установка **100**
Измерительная цепь **102**
Измерительно-вычислительный
комплекс **101**
Измерительное устройство **102**
Измерительный механизм
средства измерений **103**
Измерительный
преобразователь **101**
Измерительный прибор **100**
Измерительный сигнал **45**
Измеряемая физическая
величина **5**
Индикатор **102**

Инструментальная
погрешность измерения **66**
Исправленный результат
измерения **47**
Испытания средств измерений
177
Истинное значение физической
величины **6**
Исходный эталон **153**

Калибровка средств измерений
179
Класс точности средства
измерений **136**
Когерентная производная
единица физической величины
22
Когерентная система единиц
физических величин **22**
Компаратор **102**
Конечное значение шкалы **104**
Контактный метод измерений
47
Косвенное измерение **44**
Кратная единица физической
величины **22**

Локальная поверочная схема
156

Международный эталон **154**
Мера физической величины **100**
Метод измерений **46**
Метод измерений замещением
46
Метод непосредственной
оценки **46**
Метод совпадений **47**
Метод сравнения с мерой **46**
Методика выполнения
измерений **47**
Метрологическая аттестация
средств измерений **179**

Алфавитно-предметный указатель

- Метрологическая исправность
средства измерений **136**
Метрологическая надежность
средства измерений **136**
Метрологическая служба **176**
Метрологическая
характеристика средства
измерений **135**
Метрологический отказ
средства измерений **136**
Многократное измерение **43**
- Наблюдение при измерении 45**
Национальный эталон **153**
Начальное значение шкалы **104**
Неаддитивная физическая
величина **8**
Неисключенная
систематическая погрешность
66
Неисправленный результат
измерения **47**
Неопределенность измерений
69
Неравноточные измерения **43**
Нестабильность средства
измерений **72**
Нестандартизованное средство
измерений **99**
Номинальное значение меры
135
Нормальная область значений
влияющей величины **48**
Нормальное значение
влияющей величины **48**
Нормальные условия измерений
48
Нормативные документы по
обеспечению единства
измерений **179**
Нулевой метод **46**
- Обеспечение единства
измерений 176**
- Область измерений **45**
Объект измерения **45**
Одиночный эталон **154**
Однократное измерение **43**
Основная единица физической
величины **21**
Основная погрешность
средства измерений **72**
Основная физическая величина
6
Основное средство измерений
99
Отметка шкалы **103**
Относительная погрешность
измерения **65**
Относительная погрешность
средства измерений **71**
Относительное измерение **44**
- Первичная поверка средств
измерений 178**
Первичный измерительный
преобразователь **101**
Первичный эталон **152**
Передача размера единицы **156**
Периодическая поверка средств
измерений **178**
Проверка средств измерений **178**
Проверочная схема для средств
измерений **156**
Проверочная установка **155**
Погрешность воспроизведения
единицы физической
величины **69**
Погрешность градуировки
средства измерений **69**
Погрешность измерения **64**
Погрешность (измерения) из-за
изменений условий измерения
66
Погрешность меры **72**
Погрешность метода измерений
66

- Погрешность метода поверки **69**
Погрешность передачи размера единицы физической величины **70**
Погрешность результата однократного измерения **70**
Погрешность средства измерений **71**
Подвид измерений **45**
Показание средства измерений **125**
Показатель размерности физической величины **7**
Показывающее устройство средства измерений **103**
Поправка **69**
Поправочный множитель **69**
Порог чувствительности средства измерений **126**
Предел допускаемой погрешности средства измерений **73**
Предельная погрешность измерения в ряду измерений **70**
Предельные условия измерений **49**
Приведенная погрешность средства измерений **72**
Принцип измерений **46**
Производная единица системы единиц физических величин **22**
Производная физическая величина **7**
Промах **70**
Прямое измерение **44**

Рабочая область значений влияющей величины **48**
Рабочее пространство **49**
Рабочее средство измерений **99**
Рабочие условия измерений **48**
Рабочий эталон **153**
Равноточные измерения **43**

Размах результатов измерений **67**
Размер физической величины **5**
Размерная физическая величина **7**
Размерность физической величины **7**
Разрешение средства измерений **126**
Рассеяние результатов в ряду измерений **67**
Регистрирующее устройство средства измерений **103**
Результат измерения физической величины **47**
Род физической величины **8**
Ряд результатов измерений **47**

Система единиц физических величин **21**
Система физических величин **6**
Систематическая погрешность измерения **65**
Систематическая погрешность средства измерений **71**
Системная единица физической величины **22**
Случайная погрешность измерения **67**
Случайная погрешность средства измерений **71**
Совместные измерения **45**
Совокупные измерения **44**
Среднее взвешенное значение величины **47**
Средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического **68**
Средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений **67**

Алфавитно-предметный указатель

- Средства измерительной техники **98**
Средство измерений **98**
Средство сравнения **102**
Стабильность средства измерений **72**
Стандартизованное средство измерений **99**
Статическая погрешность измерений **70**
Статическая погрешность средства измерений **72**
Статическое измерение **43**
Субъективная погрешность измерения **66**
Суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений **70**
Сходимость результатов измерений **64**
- Табло цифрового измерительного прибора **104**
Тип средства измерений **127**
Точность результата измерений **69**
Точность средства измерений **73**
Транспортируемый эталон **154**
- Указатель средства измерений **103**
- Уравнение связи между величинами **8**
Условная шкала физической величины **23**
Ученый хранитель государственного эталона **156**
- Физическая величина **5**
Физический параметр **6**
- Хранение единицы **156**
Хранение эталона **154**
- Цена деления шкалы **104**
- Числовая отметка шкалы **103**
Числовое значение физической величины **6**
Чувствительность измерительного прибора **126**
Чувствительный элемент средства измерений **103**
- Шкала средства измерений **103**
Шкала физической величины **23**
- Эталон единицы физической величины **152**
Эталон сравнения **153**
Эталонная база страны **155**
Эталонная установка **155**
Эталонный набор **154**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, В. А. Основы метрологии: учеб. пособие / В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 280 с.
2. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: учебник для вузов / В. И. Нефедов, В. И. Хахин, Е. В. Федорова и др.; под ред. В. И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.
3. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А Сена. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
4. Сергеев, А. Г. Метрология: учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М.: Логос, 2001. – 408 с.
5. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация, сертификация: учеб. пособие/ А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М.: Логос, 2004. – 560 с.
6. Чертов, А. Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): справ. Пособие / А. Г. Чертов. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.

Нормативные документы

7. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
8. ГОСТ 8.021–84. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массы.
9. ГОСТ 8.022–91. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне $1 \cdot 10^{-16} – 30$ А.
10. ГОСТ 8.027–2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.
11. ГОСТ 8.028–86. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления.
12. ГОСТ 8.029–80. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений индуктивности.

- 13.ГОСТ 8.057–80. ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения.
- 14.ГОСТ 8.129–99. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.
- 15.ГОСТ 8.132–74. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы тока 0,04 – 300 А в диапазоне частот 0,1 – 300 МГц.
- 16.ГОСТ 8.157–75. ГСИ. Шкалы температурные практические.
- 17.ГОСТ 8.310–90. ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения.
- 18.ГОСТ 8.371–80. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электрической емкости.
- 19.ГОСТ 8.372–80. ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения.
- 20.ГОСТ 8.381–80. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
- 21.ГОСТ 8.395–80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования.
- 22.ГОСТ 8.401–80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
- 23.ГОСТ 8.417–2002. ГСИ. Единицы величин.
- 24.ГОСТ 8.558–93. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.
- 25.ГОСТ 1954–82. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие технические условия.
- 26.ГОСТ 22261–94. Средства измерения электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
- 27.ГОСТ 22315–77. Средства агрегатные информационно-измерительных систем. Общие положения.
- 28.ГОСТ 23217–78. Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.
- 29.ГОСТ Р 1.4–93. ГСС РФ. Стандарты отраслей, стандарты предприятий, стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных организаций. Общие положения.
- 30.ГОСТ Р 8.563–96. ГСИ. Методики выполнения измерений.
- 31.РМГ 29–99. ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения.