



МИР метрологии

В.Г. Лукашкин,
М.Ф. Булатов

Эталоны и стандартные
образцы в измерительной
технике.
Электрорадиоизмерения

ТЕХНОСФЕРА

Москва
2018

УДК 621.37 (075.8)

ББК 30.10я73

Л-38

*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Федерального агентства по печати и массовым
коммуникациям в рамках Федеральной целевой
программы «Культура России (2012–2018 годы)»*

Рецензент:

**Лысенко В.Г. – д.т.н., профессор. Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологической службы (ВНИИМС)**

Л-38 Лукашкин В.Г., Булатов М.Ф.

Эталоны и стандартные образцы в измерительной технике.

Электрорадиоизмерения

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 402 с. ISBN 978-5-94836-512-1

Рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны методы воспроизведения единиц физических величин на основе современных научно-технических достижений с использованием квантовых эффектов и фундаментальных физических констант. Рассмотрены структурные схемы и техническая реализация современных первичных, вторичных и рабочих эталонов с описанием их метрологических характеристик. Приведены способы передачи размера единиц физических величин от первичных эталонов и структурные схемы поверочных установок на базе государственных и локальных поверочных схем. Даются оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

УДК 621.37 (075.8)

ББК 30.10я73

© В.Г. Лукашкин, М.Ф. Булатов, 2018

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2018

ISBN 978-5-94836-512-1

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
Глава 1. Общие вопросы измерений и метрологического обеспечения	11
1.1. Меры и их роль в измерительном процессе	11
1.2. Свойства объектов измерений и физические величины	16
1.3. Шкалы физических величин	20
1.4. Классификация измерений	25
1.5. Виды средств измерений	28
1.6. Основные задачи метрологического обеспечения измерений.	30
Глава 2. Единицы физических величин	33
2.1. Принципы построения систем единиц физических величин	33
2.2. Международная система единиц физических величин	36
2.2.1. Основные и производные единицы системы	36
2.2.2. Кратные и дольные единицы.	42
2.2.3. Внесистемные единицы.	43
2.2.4. Правила написания обозначений единиц.	46
Глава 3. Погрешности средств измерений и их нормирование	49
3.1. Номенклатура метрологических характеристик средств измерений.	49
3.2. Оценка погрешностей СИ по метрологическим характеристикам	53
3.3. Оценка погрешностей СИ по классам точности	56
3.4. Погрешность и неопределенность результата измерений	63
Глава 4. Воспроизведение единиц физических величин	69
4.1. Эталоны единиц физических величин. Основные определения и понятия	69
4.2. Классификация эталонов.	71

4.3. Фундаментальные физические константы	74
4.4. Поверка и калибровка средств измерений	76
4.4.1. Основные положения	76
4.4.2. Государственные и локальные поверочные схемы	80
4.4.3. Автоматизированные поверочные установки	85
4.5. Оценка точности воспроизведения единицы величины эталоны	88
4.5.1. Общие положения	88
4.5.2. Способы выражения точности первичных, вторичных и групповых эталонов	89
4.5.3. Соотношения для вычисления характеристик погрешностей эталонов	91
4.5.4. Соотношения для вычисления характеристик неопределенностей эталонов	95
Глава 5. Эталоны единиц основных физических величин	100
5.1. Общие сведения	100
5.2. Эталон единицы массы	101
5.3. Эталон единицы времени и частоты	104
5.4. Эталон единицы длины	111
5.5. Эталон единицы силы электрического тока	118
5.6. Эталон единицы силы света	124
5.7. Эталон единицы температуры	128
5.8. Единицы количества вещества	134
Глава 6. Эталоны в области электрических и радиотехнических измерений	136
6.1. Единицы производных величин электрорадиоизмерений	136
6.2. Эволюция методов воспроизведения электрических единиц	137
6.3. Система эталонов в области электрорадиоизмерений	141
Глава 7. Базовые эталоны электрорадиоизмерений	143
7.1. Первичный эталон ома на основе квантового эффекта Холла	143
7.2. Первичный эталон вольта на эффекте Джозефсона	146

7.3. Эталон единицы магнитной индукции на эффекте ядерного магнитного резонанса	151
7.4. Рабочие эталоны времени и частоты.	154
7.5. Рабочие эталоны постоянного электрического напряжения	166
7.6. Рабочие эталоны электрического сопротивления.	175
7.7. Рабочие эталоны магнитных измерений	183

Глава 8. Эталоны в области измерений параметров

интенсивности электромагнитных колебаний.	214
8.1. Эталоны единиц переменного напряжения и силы тока	214
8.1.1. Особенности измерений переменного напряжения и силы тока	214
8.1.2. Измерительные преобразователи переменного напряжения и силы тока	216
8.1.3. Государственные первичные эталоны переменных напряжений (токов) и коммутационных импульсов	220
8.1.4. Рабочие эталоны и поверочные установки переменного электрического напряжения и тока	227
8.2. Эталоны единицы электрической мощности	239
8.2.1. Общие сведения	239
8.2.2. Методы измерения электрической мощности	242
8.2.3. Государственные первичные эталоны.	248
8.2.4. Рабочие эталоны электрической мощности	260
8.3. Эталоны единиц электромагнитного поля.	271
8.3.1. Общие сведения	271
8.3.2. Методы воспроизведения электромагнитного поля	274
8.3.3. Первичный эталон напряженности электрического поля на частотах 0,0003—30 МГц	276
8.3.4. Первичный эталон напряженности магнитного поля на частотах 0,01—30 МГц	278
8.3.5. Первичный эталон напряженности электрического поля на частотах 30—1000 МГц . .	280
8.3.6. Рабочие эталоны единиц напряженности электромагнитного поля	283



Глава 9. Эталоны компонентов цепей с сосредоточенными постоянными	296
9.1. Характеристики и параметры линейных компонентов с сосредоточенными постоянными	296
9.2. Эталоны единиц электрической емкости	300
9.2.1. Общие сведения	300
9.2.2. Государственный первичный эталон электрической емкости	305
9.2.3. Рабочие эталоны электрической емкости	308
9.3. Эталоны единицы индуктивности	310
9.3.1. Государственный первичный эталон индуктивности	310
9.3.2. Вторичные и рабочие эталоны единицы индуктивности	313
9.4. Эталоны единицы электрической добротности	315
9.4.1. Общие сведения	315
9.4.2. Государственный первичный эталон единицы электрической добротности	319
Глава 10. Эталоны параметров цепей и трактов СВЧ с распределенными постоянными	322
10.1. Общие сведения	322
10.2. Методы и средства измерений параметров СВЧ-цепей	327
10.3. Государственный первичный эталон единицы волнового сопротивления в коаксиальных трактах	335
Глава 11. Эталоны в области измерений параметров формы и спектра радиосигналов	340
11.1. Общие сведения и средства измерений параметров формы и спектра радиосигналов	340
11.2. Эталоны единицы коэффициента гармоник	344
11.2.1. Основные параметры квазигармонического сигнала	344
11.2.2. Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник	348
11.2.3. Рабочие эталоны единицы коэффициента гармоник	352

11.3. Эталоны единицы коэффициента амплитудной модуляции	354
11.3.1. Основные параметры АМ-сигнала.	354
11.3.2. Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции	357
11.4. Эталоны единицы девиации частоты частотно-модулированных колебаний	360
11.4.1. Основные параметры сигналов с угловой модуляцией	360
11.4.2. Методы измерений параметров ЧМ-сигналов . .	364
11.4.3. Государственный первичный специальный эталон единицы девиации частоты	367
11.4.4. Рабочие эталоны единицы коэффициента амплитудной модуляции и девиации частоты. . .	370
Заключение	374
Предметный указатель	377
Приложение 1. Перечень государственных первичных эталонов единиц величин (по состоянию на 01.04.2017 г.)	379
Приложение 2. Список используемых сокращений	394
Литература	396
Информация об авторах	400

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время измерения и их теоретическая основа — метрология охватывают практически все народно-хозяйственные и научно-технические направления. Точные измерения неоднократно позволяли делать фундаментальные научные открытия. Соответственно, в интересах каждой страны и на международном уровне необходимо единообразие в воспроизведении единиц измеряемых физических величин, для того чтобы результаты измерений могли быть согласованы на уровне требуемой точности в узаконенных единицах.

Воспроизведение узаконенных единиц величин и состава веществ в измерительной технике осуществляется с помощью высокоточных мер — эталонов и стандартных образцов. При этом высокоточное воспроизведение единиц является первостепенной задачей не только самого измерительного процесса, но и системы обеспечения единства измерений, которая гарантирует сопоставимость результатов измерений, выполненных в узаконенных единицах величин с помощью различных средств измерений, в различных местах и в разное время.

Вопросами теории и практики обеспечения единства измерений и достижения требуемой точности измерений занимаются метрологические службы России и зарубежных стран. Важнейшей задачей метрологических служб является также создание эталонов величин, привязанных к физическим константам и имеющих диапазоны измерений, необходимые для современной науки и техники.

Технической основой системы обеспечения единства измерений в Российской Федерации является национальная эталонная база и стандартные образцы, представляющие собой совокупность государственных и исходных эталонов, которые обеспечивают воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц величин другим средствам измерительной техники. Состояние и технический уровень эталонной базы и технических средств метрологического обеспечения в конечном итоге определяют качество измерений и в определенной мере отражают уровень научно-технического развития страны.

В России работает ряд метрологических институтов, в которых разрабатываются и хранятся государственные эталоны электрических и неэлектрических величин и стандартные образцы. Среди них:



- Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС, г. Москва);
- Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ, г. Санкт-Петербург);
- Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, пос. Менделеево Московской области);
- Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ, г. Москва);
- Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ, г. Екатеринбург);
- Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, г. Новосибирск).

На государственном уровне регулирование отношений по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), нормативными документами метрологических служб и законами «Об обеспечении единства измерений» и «О техническом регулировании».

Наиболее развитыми центрами мировой метрологии являются:

- Международное бюро мер и весов (BIPM, Paris);
- Национальный институт стандартов и технологий США (NIST);
- Федеральный физико-технический институт Германии (PTB);
- Национальная физическая лаборатория Англии (NPL).

В настоящее время, несмотря на существование огромного числа книг и публикаций по основам метрологии и метрологическому обеспечению, отдельным видам измерений и существующим эталонам, очень мало учебной технической литературы, где бы более подробно рассматривались вопросы физических принципов построения различных мер и стандартных образцов.

Из последних изданий по современной эталонной базе следует отметить своевременную работу И.П. Захарова и Ю.Ф. Павленко «Эталоны в области электрорадиоизмерений», где достаточно подробно рассмотрены теория, физические эффекты и структурные схемы воспроизведения единиц электрических величин. К сожалению, в данной работе очень мало информации о рабочих эталонах отечественного и зарубежного производства, которые необходимы при проведении широкого ряда научно-технических поверочных работ и метрологических исследований.

Предлагаемая книга является попыткой дополнить материалы в области создания эталонной базы электрических и неэлектрических величин, включая рабочие эталоны и стандартные образцы. Данная работа не претендует на описание всех существующих эталонов и стандартных образцов физико-химических свойств материалов и веществ. Рассмотрены история развития и принципы построения наиболее распространенных эталонов электрических и неэлектрических величин, имеющие важнейшее научно-техническое и народно-хозяйственное значение. Например, эталонная база расходометрии энергоносителей и температурных измерений, эталоны геометрических величин в области наноперемещений, метрологическое обеспечение аналитических приборов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

1.1. Меры и их роль в измерительном процессе

В метрологии получение количественной информации о свойствах различных объектов с заданной точностью и достоверностью проводится на основе измерительного процесса (далее — измерений). В результате развития метрологии как науки и соответствующей ей нормативной базы определение измерений неоднократно изменялось. Одно из первых определений было дано в ГОСТ 16263-70: «*измерение* — это процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств». Более полное определение и физическая сущность измерения были раскрыты в рекомендациях РМГ 29-99. В них измерение — это совокупность операций по применению технических средств, хранящих единицу физической величины (ФВ), обеспечивающих нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей и получение численного значения этой величины. Последнее определение измерений дано в РМГ 29-2013, где «измерение — процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине».

Обобщая сущность измерений, можно отметить, что измерение — это познавательный процесс, посредством которого определяется отношение одной (измеряемой) величины к другой величине, принимаемой за единицу сравнения, воспроизводимую мерой.

Следует отметить, что мера является достаточно широким понятием и жестко связана с системой единиц физических величин (например с метрической системой мер). Вещественными или материальными мерами для ФВ являются эталоны и стандартные образцы. Одно из первых определений меры ФВ было дано в РМГ 29-99: «*мера* — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных раз-

меров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью».

Другое определение меры дано в [1], где «мера (материальная) — средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями». В большинстве случаев измерительные приборы включают в свой состав меры или градуируются при помощи мер. К наиболее высокоточным мерам относятся эталоны.

Меры длины, площади и веса были уже известны в Египте за три тысячи лет до н.э. Строительство ирригационных систем, возведение храмов и дворцов, сооружение гигантских пирамид было бы невозможно без измерений и использования мер.

Первые меры были связаны с единицами измерений и начали появляться с того момента времени, когда у человека возникла необходимость выражать что-либо количественно (например число предметов). В этом случае измерение заключалось в счете числа предметов, а единицей счета был один предмет. Однако далее с развитием торговли задача усложнялась, так как возникла необходимость определять количество таких объектов, которые не поддавались штучному счету, — сыпучих тел и жидкостей. При этом появились меры объема. Потребность измерения длины вызвала появление мер длины. Так, первыми мерами длины были части тела человека: пядь, ступня, локоть, шаг и т.п. Эти меры были одновременно и единицами длины. Такие единицы были неудобны для измерений как малых, так и больших размеров конкретной величины и требовали дальнейшего усовершенствования (введения множителей и отрыва единиц измерения от вещественных мер). Кроме того, с возникновением сравнительно больших государств появилась проблема упорядочения и узаконения мер. Хаос и разноречивость в области мер и весов усложнял торговлю как внутри отдельных стран (например, каждый город имел свои меры), так и на международном уровне. Потребность в установлении узаконенных мер была настолько необходимой, что они начали постепенно вводиться в различных, и в первую очередь наиболее развитых, странах.

В Англии узаконенные меры впервые появились в 1494 году, а во Франции — в 1735 году [2]. В 1789 году Национальным собранием Франции был внесен правительственный проект об установлении единых для всей страны мер. Специальная комиссия по предложению Лапласа приняла в качестве единицы длины естественный эталон — одну десятиmillionную часть четверти длины Парижского меридиана. Этой

единице было присвоено название «метр» от греческого слова *μετρον*, что означает «мера».

Метр послужил началом создания *метрической* (десятичной) системы мер для единиц физических величин. Одновременно были созданы и вещественные (предметные) платиновые эталоны единицы длины и массы — метра и килограмма.

В России на рубеже XVI века церковный надзор за «мерами и весами» постепенно уступил место государственному и завершился унификацией российских и английских мер длины. В 1868 году в России были изданы «Сравнительные таблицы десятичных и русских мер». В 1899 году в России был принят закон, который впервые допускал применение единиц Международной метрической системы мер (метра и килограмма) наряду с традиционными русскими мерами (аршином и фунтом). Особая заслуга в развитии отечественной и мировой метрологии и метрологического обеспечения принадлежит великому русскому ученому Д.И. Менделееву — основателю научной и практической метрологии в России. Он является создателем первого в России научного учреждения по метрологии — Главной палаты мер и весов, ныне Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»).

Современный этап развития метрологии характеризуется открытием новых физических явлений, развитием электроники, атомной и ядерной физики, позволяющей найти пути более точного и надежного воспроизведения единиц ряда физических величин. Одной из основных задач метрологических служб Российской Федерации на данный период остается усовершенствование мер и создание высокоточной и надежной национальной эталонной базы, являющейся основой системы обеспечения единства измерений. При этом состояние и технический уровень эталонной базы отражают также уровень научно-технического развития страны. Другой важнейшей стороной развития является унификация мер и эталонов на международном уровне. Следует отметить, что проблема унификации мер не решена полностью и в наше время.

Обобщенная классификация мер приведена на рис. 1.1. Образцом наивысшего достижения в области разработки и создания мер ФВ являются *государственные эталоны*, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц физической величины и передачи размера единицы вторичным эталонам.

Отдельную категорию метрологических мер представляют стандартные образцы, обладающие определенными физическими свойствами



Рис. 1.1. Классификация измерительных мер

(меры цветности, твердости и др.), а также контрольные растворы и газовые смеси, имеющие известные и воспроизводимые свойства. Они могут применяться в качестве рабочих эталонов с присвоением класса точности по государственной поверочной схеме [1].

В измерительных процессах меры выполняют следующие важнейшие задачи:

- используются как элемент сравнения в средствах измерений и поверочных установках;
- обеспечивают воспроизведение, хранение и передачу единиц физических величин.

При этом раскрывается и физический смысл измерений, который заключается в *сравнении* размера измеряемой величины с ее единицей — мерой, а различные приемы сравнения определяют *метод измерения*.

Последнее определение соответствует и простому математическому равенству, которое в случае непосредственного или прямого измерения при сравнении *однородных* величин устанавливает числовой

множитель q (числовое значение измеряемой величины) и имеет вид

$$X = q [X], \quad q = \frac{X}{[X]}, \quad (1.1)$$

где X — измеряемая физическая величина; $[X]$ — единица измерения данной ФВ (однородная мера); q — положительное рациональное или иррациональное число (например число π при измерении длины окружности ее диаметром).

Косвенные измерения проводятся на основе известной зависимости между измеряемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Следует учитывать, что в процессе измерения физический размер величины X в (1.1) всегда остается неизменным, но числовое значение q может изменяться и зависит от выбора значения единицы измерения $[X]$, которая для одного и того же размера может быть различна.

В общем случае измерение является сложным случайным процессом. Сложность процесса обусловлена влиянием свойств объекта измерений и средств измерений, дополнительными промежуточными преобразованиями *неоднородных* величин, конкретными условиями проведения измерений и задачами автоматизации.

Состав основных операций, проводимых в измерительном процессе с применением меры, приведен на структурной схеме, показанной на рис. 1.2.

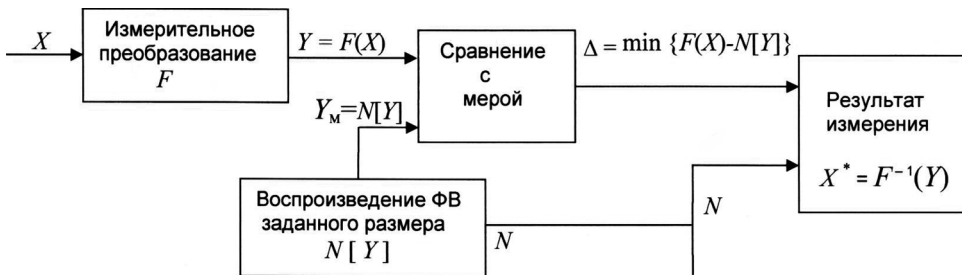


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема измерительного процесса

Условием реализации процедуры прямого измерения является выполнение следующих элементарных операций: измерительного преобразования измеряемой величины X в другую однородную или неоднородную с ней $Y = F(X)$; воспроизведение ФВ заданного размера $N[Y]$, однородной с преобразованной величиной Y ; сравнение однородных ФВ (преобразованной Y и воспроизводимой регулируемой мерой Y_m).

Для получения результата измерения необходимо, чтобы погрешность сравнения Δ между величинами воспроизводимой мерой $Y_m = N[Y]$ и $F(X)$ была минимизирована. Тогда результат измерения находится как $X^* = F^{-1}(Y)$, где F^{-1} — операция (градуировка), обратная измерительному преобразованию F .

При этом метод измерения необходимо рассматривать как некоторый алгоритм с использованием операций воспроизведения и сравнения с мерой измерительного преобразования, масштабирования и запоминания для получения результата измерения [3]. В основе описания такой измерительной процедуры лежит уравнение измерений, которое устанавливает связь результата измерений с входным воздействием и выполняемыми в СИ преобразованиями измеряемой величины X в другую величину Y , однородную или неоднородную с ней. В общем виде измерительное преобразование описывается уравнением

$$Y = \Phi(X), \quad (1.2)$$

где Φ — некоторая функция или функционал, учитывающий различные виды математических операций, производимых над входной величиной X .

Различные виды формализованного описания измерительной процедуры, в основе которой лежит уравнение преобразования, рассмотрены в [4]. Наличие функции преобразования или уравнения измерений позволяет сформировать необходимые измерительные алгоритмы и программное обеспечение, а также провести метрологический анализ сложных преобразований и полученных результатов измерений.

1.2. Свойства объектов измерений и физические величины

Постепенное совершенствование измерительного процесса и отрыв единиц измерений от вещественных (предметных) мер привели к необходимости введения новых понятий для описания качественных и количественных характеристик измеряемого объекта. К таким понятиям прежде всего относят философскую категорию «свойство объекта» (процесса, явления).

Свойство — сторона объекта, которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (процессами, явлениями). Свойство объекта является *качественной* категорией, т.е. это признак, при-

сущий объекту, который отличает его от других объектов или делает похожим на них (твердость, шероховатость, цвет и т.д.) [1]. Качественной определенностью величины является ее род (однородные или неоднородные величины). Качественные модели свойств широко используются при классификации, распознавании образов, диагностировании, химическом анализе, установлении сортности и т.п. Для количественного описания различных свойств физических тел и процессов вводится понятие «величина».

Величина — это свойство, которое может быть оценено *количественно*. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной. Естественные науки изучают свойства объектов, обладающие определенной интенсивностью, которая может быть большей или меньшей (например температура, давление, скорость). Выделяют физические величины — для естественных и технических наук, и нефизические — для общественных наук, например экономики. В общем случае объектами измерений являются как физические, так и нефизические объекты, например стоимость товаров.

Физическая величина (ФВ) — это одно из свойств физического объекта (явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них (например масса материального объекта) [1]. Таким образом, физические величины — это измеренные свойства физических объектов и процессов (например времени). Для определения количественного содержания в данном объекте физической величины вводится понятие «размер величины».

Размер физической величины — это количественная определенность ФВ, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Величину размера можно представить отвлеченным числом — значением ФВ.

Значение физической величины — это выражение размера ФВ в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения. Между размером и значением ФВ есть принципиальная разница. Размер физической величины объекта существует реально и остается неизменным, тогда как числовое значение ФВ изменяется при выборе другой единицы измерения $[X]$ в уравнении (1.1).

Единица измерения физической величины — это величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице (например 1 мм). Она применяется для количественного выражения однородных ФВ. На практике широко применяется поня-

тие «узаконенные единицы», которое раскрывается как «система единиц».

Классификация физических величин приведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Классификация физических величин

По видам явлений ФВ разделяют на следующие группы [3]:

- вещественные или пассивные величины, представляющие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий (например масса, плотность, индуктивность, емкость и др.). Для их измерений необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации;
- энергетические (активные) – это величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи

и использования энергии (ток, напряжение, мощность). Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

- величины, характеризующие протекание процессов во времени. К этой группе относятся спектральные характеристики, корреляционные функции и др. По принадлежности к различным группам физических процессов выделяют следующие виды ФВ: пространственно-временные, электрические и магнитные, механические, тепловые, акустические, физико-химические, световые, ионизирующего излучения, атомной и ядерной физики.

По степени условной независимости от других величин данной группы ФВ делятся на основные (условно независимые) и производные (условно зависимые).

По наличию размерности ФВ делятся на размерные и безразмерные.

Однако следует учитывать, что физические объекты обладают неограниченным числом свойств, которые проявляются бесконечным разнообразием. Многообразие свойств объектов затрудняет их отражение совокупностями чисел. Среди множества проявлений свойств объектов можно выделить и несколько общих. К ним можно отнести три наиболее общих проявления, обнаруживающихся в отношениях эквивалентности свойств, порядка и аддитивности с соответствующими постулатами.

Отношение эквивалентности — это отношение, в котором данное свойство у различных объектов А и В оказывается одинаковым или неодинаковым. Если свойство проявляет себя только в отношении эквивалентности, то обладающие им объекты могут быть обнаружены, классифицированы, подвергнуты контролю по классам свойств эквивалентности. Примером объектов, обладающих свойствами эквивалентности, могут служить, например, виды животных, виды растений, виды насекомых и т.п.

Отношение порядка — это отношение, в котором данное свойство у различных объектов оказывается больше или меньше. Множество, в котором зафиксировано отношение порядка между его элементами, называют упорядоченным множеством.

Отношение аддитивности — это отношение, когда однородные свойства различных объектов могут суммироваться. В математике аддитивностью называют следующее свойство: значение величины целого объекта равно сумме величин, соответствующих частям целого, при любом варианте разбиения объекта на части.

В общем случае физические величины целесообразно разделять на измеряемые и оцениваемые. *Измеряемые ФВ* могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Физические величины (в том числе и нефизические), для которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только *оценены*. Под оцениванием в таком случае понимается операция приписывания данной величине определенного числа, проводимая по установленным правилам. Оценивание величины производится при помощи шкал.

1.3. Шкалы физических величин

Стремительное развитие информатики, рост количества анализируемой информации, расширение представлений об измеряемых величинах и усложнение измерительных задач привели к появлению концепции, ставшей позднее основой теории шкал. Ее создание позволило дать строгое обоснование корректности измерительных операций к ряду явлений, до того с трудом поддававшихся количественному или даже формальному описанию.

Под *шкалой* физической величины понимают принятую по соглашению последовательность числовых значений, присваиваемых *ФВ* по мере ее возрастания (или убывания). Обычно эта последовательность устанавливается принятым методом измерений данной величины. Более полное определение дано в рекомендациях РМГ 83-2007 «ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения». В соответствии с данными рекомендациями под шкалой измерений следует понимать отображение множества различных проявлений объекта количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений). При этом качественные свойства объекта устанавливаются оценкой по соответствующей шкале условных знаков баллами, обозначением цвета, состоянием, классификационными символами и т.п. Количественные свойства объекта выражаются в виде определенного числа единиц измерения.

Большинство свойств описывается одномерными шкалами. Результаты измерений в такой шкале выражаются одним числом, знаком или обозначением. Вместе с тем имеются свойства, описываемые многомерными шкалами. Результаты измерений в такой шкале выражаются двумя или более числами, знаками или обозначениями. Так,

цвет, являясь качественным свойством, обладает и некоторыми количественными признаками (например яркостью).

В соответствии с документом РМГ 83-2007 различают пять типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные. Шкалы наименований и порядка, не имеющие единиц измерений, называют неметрическими шкалами. Шкалы разностей и отношений объединяют термином «метрические шкалы» [2]. Метрическая шкала, как правило, реализуется с помощью эталона. Эталоны метрических шкал могут воспроизводить одну точку шкалы (например эталон массы — 1 кг), некоторый участок шкалы (эталон длины) или практически весь диапазон шкалы (эталон времени).

Шкала наименований (шкала классификации). Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности [2, 3]. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами ФВ. Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствует понятие нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерений. Символические шкалы наименований часто материализуются в виде атласов. Примерами таких шкал могут быть шкалы измерений цвета и белизны. Например, специализированный для полиграфии атлас цветов содержит 1358 материальных образцов цвета. Цветовые измерения также широко применяются в световой и цветовой сигнализации, в частности на транспорте. На соответствующие методы цветовых измерений существует значительное число национальных и международных стандартов. Таким образом, шкалы наименований применяют для измерения качественных проявлений свойства. Количественные проявления свойства измеряют по шкалам порядка.

Шкала порядка (шкала рангов). Такая шкала описывает свойство объекта, для которого имеет смысл не только отношение эквивалентности, но и отношение порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Такое свойство называют величиной. Результаты измерений по шкалам порядка выражаются в баллах, условных числах и т.п. Таким образом, если свойство данного объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления данного свойства, то для него может быть построена шкала порядка. В шкалах порядка может существовать или не существовать нуль, но принципиально нельзя ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности. К таким шкалам относятся шкалы

измерения твердости металлов (Бринелля, Виккерса, Роквелла, Шора) и минералов (шкала Мооса). К шкалам порядка относят условную шкалу силы ветра по его действию на наземные предметы или по волнению на море (шкала Бофорта). Для характеристики энергии и разрушительной силы землетрясений разработана шкала внешних проявлений последствий землетрясений на поверхности Земли. Степень сотрясения почвы на поверхности Земли выражают в баллах по международной двенадцатибалльной сейсмической шкале Меркалли, представленной в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Сейсмическая шкала Меркалли

Балл	Название землетрясения	Краткая характеристика землетрясения
1	Незаметное	Отмечается только сейсмическими приборами
2	Очень слабое	Ощущается отдельными людьми, находящимися в состоянии полного покоя
3	Слабое	Ощущается лишь небольшой частью населения
4	Умеренное	Распознается по легкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стекол, скрипу дверей и стен
5	Довольно сильное	Общее сотрясение здания, 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 крутых склонах и на сырой почве. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Дома сильно повреждаются
9	Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов
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

Более объективной величиной оценки силы землетрясения служит *магнитуда* землетрясения, характеризующая общую энергию сейсмических волн, возбужденных подземными толчками. Магнитуда изме-

ряется в джоулях и определяется по шкале Рихтера. Сопоставление шкал Меркалли и Рихтера приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Сопоставление шкал Меркалли и Рихтера

Показатели (баллы) по шкалам		Магнитуда, Дж
Меркалли	Рихтера	
I	3,5	$< 1,6 \cdot 10^7$
II	3,5	$1,6 \cdot 10^7$
III	4,2	$7,5 \cdot 10^8$
IV	4,5	$4,0 \cdot 10^9$
V	4,8	$2,1 \cdot 10^7$
VI	5,4	$1,6 \cdot 10^{11}$
VII	6,1	$2,8 \cdot 10^{13}$
VIII	6,5	$2,5 \cdot 10^{14}$
IX	6,9	$2,3 \cdot 10^{15}$
X	7,3	$2,1 \cdot 10^{16}$
XI	8,1	$1,7 \cdot 10^{18}$
XII	$> 8,1$	$> 1,7 \cdot 10^{18}$

Оценивание качественных и количественных свойств объекта по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным.

Шкала интервалов (шкала разностей). Данные шкалы величин являются дальнейшим развитием шкал порядка и применяются для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало — нули, опирающиеся на какие-либо реперные точки. Примером таких шкал могут быть летоисчисления по различным календарям. Время как физическая величина также относится к шкале интервалов. В настоящее время параллельно действуют следующие шкалы времени: шкала атомного времени, воспроизводимая государственным первичным эталоном времени и частоты, и астрономическая шкала. Эмпирические (опытные) температурные шкалы Реомюра, Фаренгейта, Цельсия являются также шкалами интервалов.

Шкала интервалов задается произвольным выбором двух значений x_0 и x_1 величины, которые просто реализуются физически. Эти значения называются опорными (реперными) точками, а интервал $(x_1 - x_0)$ — основным интервалом. Точка x_0 принимается за начало отсчета шкалы,

а отношение $(x_1 - x_0)/n = [x]$ — за единицу величины x . При этом число делений основного интервала n выбирается таким, чтобы $[x]$ было целой величиной.

Пример 1.1

Температурная шкала Цельсия является шкалой интервалов. Термометрическим веществом выбрана вода и ее свойства. На данной шкале x_0 — температура таяния льда, а x_1 — температура кипения воды. Определив интервал, находим единицу шкалы — градус Цельсия $[x_c] = (x_1 - x_0)/100 = 1^\circ\text{C}$.

Для эмпирических шкал Фаренгейта и Реомюра выбираются другие термонесители и основные интервалы.

С разностями отсчетов по шкале интервалов можно выполнять любые арифметические операции. К ним применима процедура для отыскания математического ожидания, стандартного отклонения, коэффициента асимметрии. Результаты измерений можно характеризовать погрешностью или неопределенностью.

Шкала отношений. Эти шкалы являются наиболее совершенными и описывают свойства объектов, удовлетворяющие отношениям порядка, эквивалентности, аддитивности и в ряде случаях — пропорциональности. Шкалы отношений подразделяются на шкалы 1-го рода и 2-го рода. Шкалы 1-го рода — пропорциональные шкалы, шкалы 2-го рода — это аддитивные шкалы (шкалы массы, силы). Основное отличие шкал отношений заключается в выборе естественных нулей и принятых по соглашению условных единиц. С формальной точки зрения шкала отношений является шкалой интервалов с естественным нулем.

Примером шкалы 1-го рода может служить термодинамическая температурная шкала. В термодинамике температура определяется как производная энергии всего тела. Такая температура всегда положительна. Шкала термодинамической температуры начинается от абсолютного нуля и является пропорциональной шкалой отношений. При абсолютном нуле (низшей возможной температуре) прекращается всякое движение, давление газа на стенки сосуда исчезает. Единица температуры по данной шкале была определена как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды ($273,16\text{ К} = 0,01^\circ\text{C}$) и получила название «кельвин» — К.

Воспроизведение термодинамической шкалы происходит с большими трудностями. Поэтому для обеспечения единства измерений

в международном масштабе для практических целей в 1990 году была утверждена Международная температурная шкала «МТШ-90». Эта шкала определена в диапазоне от 0,65 К до наибольших температур, которые можно измерить по закону Планка. Шкала построена таким образом, что по всему ее диапазону числовое значение температуры максимально приближено к значению термодинамической температуры в соответствии с лучшими оценками на период принятия шкалы (расхождение не превышает 3 мК).

Абсолютные шкалы. Это шкалы отношений (пропорциональные или аддитивные) для безразмерных (внесистемных) величин, не зависящих от принятых систем единиц измерений. Единицы абсолютных шкал безразмерны (проценты, доли, полные углы, децибелы, биты и т.п.). Спецификация абсолютной шкалы допускает изменения. Так, при измерении плоского угла используется целая группа единиц: радиан, угловой градус, полный оборот, румб и т.д.

1.4. Классификация измерений

Измерения классифицируются по различным признакам. Наибольшее распространение получила классификация по *способам получения* результатов измерений, так как это удобно при выделении методических погрешностей. Согласно этому признаку измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Прямыми называются измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно по показаниям средства измерений, например измерение напряжения вольтметром.

Косвенные измерения — это измерения, при которых значение измеряемой величины находят на основании известной зависимости между ней и величинами, подвергаемыми прямым измерениям, например измерение плотности вещества $\rho = m/V$ по результатам прямых измерений массы m и объема V .

Совокупными называются проводимые одновременно измерения нескольких *одноименных* физических величин, при которых их искомые значения находят решением системы уравнений.

Пример 1.2

С помощью совокупных измерений найти значения величин сопротивлений R_1, R_2, R_3 в схеме соединений, показанной на рис. 1.4.

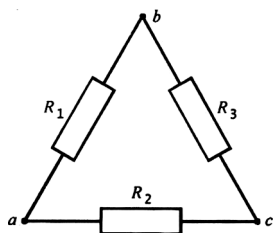


Рис. 1.4. К методу совокупных измерений

Для решения поставленной задачи необходимо измерить величины сопротивлений данной схемы между вершинами треугольника R_{ab} , R_{ac} , R_{bc} . Полученные результаты измерений подставляем в систему уравнений с тремя неизвестными:

$$R_{ab} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{ac} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{bc} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1.3)$$

Решая систему (1.3), можно определить искомые значения R_1 , R_2 и R_3 методом совокупных измерений.

Совместными называются проводимые одновременно измерения двух или нескольких *неодноименных* величин для установления зависимости между ними. В этом случае искомое значение находится также в результате решения системы уравнений.

Пример 1.3

Определить зависимость сопротивления резистора от изменения температуры, используя обобщенную формулу

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2], \quad (1.4)$$

где R_{20} — сопротивление резистора при $t = 20$ °C; α , β — температурные коэффициенты линейного и квадратичного членов формулы.

Для определения величин R_{20} , α и β измеряют сопротивление резистора R_t при трех различных значениях температуры (t_1 , t_2 , t_3). Далее составляют систему из трех уравнений, по которой находят искомые параметры R_{20} , α и β :

$$\begin{aligned} R_{t_1} &= R_{20} [1 + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2], \\ R_{t_2} &= R_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2], \\ R_{t_3} &= R_{20} [1 + \alpha (t_3 - 20) + \beta (t_3 - 20)^2]. \end{aligned} \quad (1.5)$$

По характеристике точности измерения разделяют на равноточные и неравноточные.

Равноточными называются измерения какой-либо ФВ, выполненные одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

Неравноточными называются измерения ФВ, выполненные различными по точности средствами измерений и в разных условиях.

По отношению к характеру изменения измеряемой величины измерения разделяют на *статические* и *динамические*.

В зависимости от метрологического назначения измерения делятся на *технические* и *метрологические*.

В зависимости от числа измерений, проводимых во время эксперимента, различают одно- и многократные измерения.

Однократными называются измерения, выполненные один раз.

К *многократным* (как правило, более пяти измерений) относятся измерения одного и того же размера ФВ, следующие друг за другом.

Качество измерений характеризуется точностью и достоверностью (степенью доверия) результатов измерений.

С процессом измерения также тесно связаны и другие технические понятия: контроль, диагностика и испытание.

Контроль — это процесс установления с помощью измерений соответствия параметров или состояния объекта принятым техническим требованиям (нормам). В общем случае контроль является очень широким понятием и классифицируется по различным признакам в зависимости от объекта, средства и метода (характера) контроля. Так, в зависимости от применяемых средств выделяют следующие виды контроля: визуальный, органолептический, инструментальный. По применяемым методам и характеру воздействия на объект контроль разделяют на активный (при финишной обработке деталей), пассивный, разрушающий и неразрушающий.

Разрушающий контроль применяют для выявления эксплуатационных и предельных параметров объекта.

Неразрушающий контроль — это метод контроля, при котором не нарушается пригодность изделия к эксплуатации. Данный контроль разделяют на девять видов: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, акустический, радиационный и проникающими веществами.

Качество контроля оценивается вероятностью ошибок I и II рода.

Техническая диагностика — область практического применения методов и средств контроля, связанная с анализом состояния объек-

та, предсказанием, поиском и обнаружением дефектов. Наряду с аппаратными средствами широко используются и программные методы диагностирования, например, при поисках неисправностей в ЭВМ.

Испытание — экспериментальное определение количественных и качественных характеристик объектов (продукции) методами неразрушающего или разрушающего контроля. Так, например, качество СИ и СК определяется системой государственных испытаний, обеспечивающих метрологическую экспертизу данных средств. Испытания позволяют проверить правильность конструктивных и схемотехнических решений и оценить степень соответствия показателей качества продукции требованиям стандартов и нормативных документов.

Средства испытаний (машины, стенды) образуют широкий класс технических устройств, работающих на различных принципах. Основная задача испытательной техники состоит в том, чтобы максимально приблизить условия испытаний к экстремальным условиям эксплуатации и количественно определить в этих условиях изменения свойств и характеристик изделий.

1.5. Виды средств измерений

Средство измерений (СИ) — это техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным в течение известного интервала времени. Данное определение раскрывает метрологическую сущность средства измерений, заключающуюся в воспроизведении единицы ФВ и в неизменности размера хранимой единицы во времени. Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные технические устройства, которые реализуют одну из двух функций:

- воспроизводят величину заданного (известного) размера, например магазин сопротивлений;
- вырабатывают сигналы или показания, несущие информацию о значении измеряемой величины.

Последняя функция является основной и может быть реализована только посредством измерения, операции которого показаны на

рис. 1.2. Очевидно, что СИ должны содержать устройства, которые выполняют эти операции. Такие устройства объединяются под общим названием «элементарные СИ» [3].

В их число входят меры, измерительные преобразователи и устройства сравнения.

В соответствии с определением понятия «измерение» СИ должно хранить и воспроизводить единицу ФВ (меру), размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение заданного интервала времени. В качестве меры в измерениях могут использоваться рабочие эталоны, стандартные образцы, градуировочные характеристики и др.

Все многообразие СИ классифицируется по различным признакам. Так, по роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, СИ делятся на метрологические и рабочие.

По уровню стандартизации СИ разделяют на стандартизированные и нестандартизированные (уникальные) СИ. По уровню автоматизации выделяют неавтоматические, автоматизированные и автоматические СИ (АСИ).

Основная классификация СИ связана с их разделением на виды по *функциональному назначению*. Данная классификация, включающая элементарные и комплексные СИ, показана на рис. 1.5.

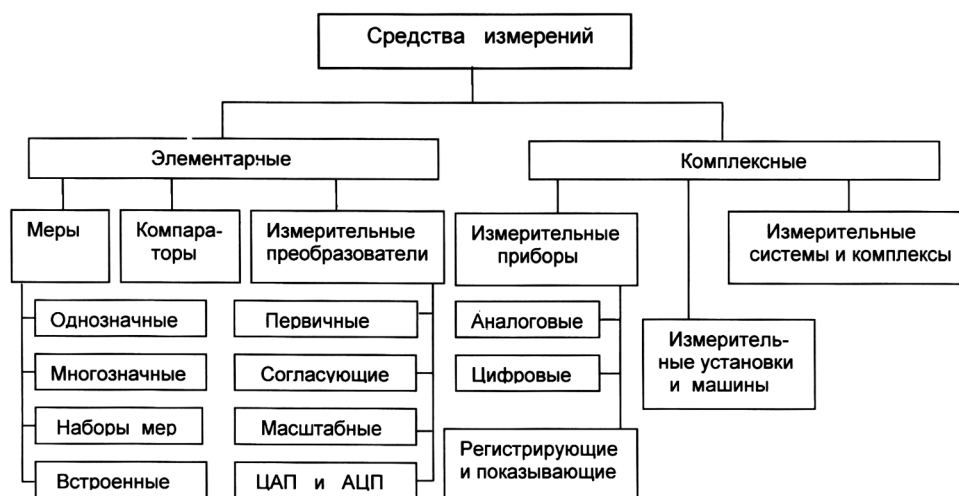


Рис. 1.5. Классификация средств измерений

Элементарные СИ предназначены для реализации отдельных операций. Каждое из данных СИ (меры, устройства сравнения и преобразователи), взятое по отдельности, не может осуществить операцию измерения.

Комплексные СИ предназначены для реализации всей процедуры измерений, включая процесс отображения информации.

1.6. Основные задачи метрологического обеспечения измерений

Государственное регулирование метрологической деятельности в России осуществляется на основе закона «Об обеспечении единства измерений» (Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ). В законе определены формы государственного регулирования по всем вопросам метрологической деятельности и требования по обеспечению единства измерений. Выполнение принципов технического регулирования и единства измерений невозможно без метрологического обеспечения (МО).

Метрологическое обеспечение — это комплекс мероприятий, направленный на установление и применение научных и организационных основ, технических средств, норм и правил, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Объектом МО являются все стадии жизненного цикла изделия, продукции или услуги.

При разработке МО метрологическими службами необходимо использовать системный подход, заключающийся в рассмотрении взаимосвязанных процессов, объединенных одной целью — достижением требуемого *качества* измерений. При этом необходимо решать следующие основные задачи МО:

- технико-экономическое обоснование и выбор средств измерений, испытаний и контроля и установления их оптимальной номенклатуры;
- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений при контроле качества продукции и управления процессами;
- разработка, внедрение и аттестация современных методик выполнения измерений, испытаний и контроля (МВИ);

- поверка, метрологическая аттестация и калибровка измерительных средств и испытательного оборудования, применяемого на предприятии;
- контроль за производством, состоянием, применением и ремонтом измерительных средств, а также за соблюдением метрологических правил и норм на предприятии;
- участие в разработке и внедрении стандартов предприятия;
- внедрение международных, государственных и отраслевых стандартов, а также иных нормативных документов Ростехрегулирования;
- проведение метрологической экспертизы проектов нормативной, конструкторской и технологической документации;

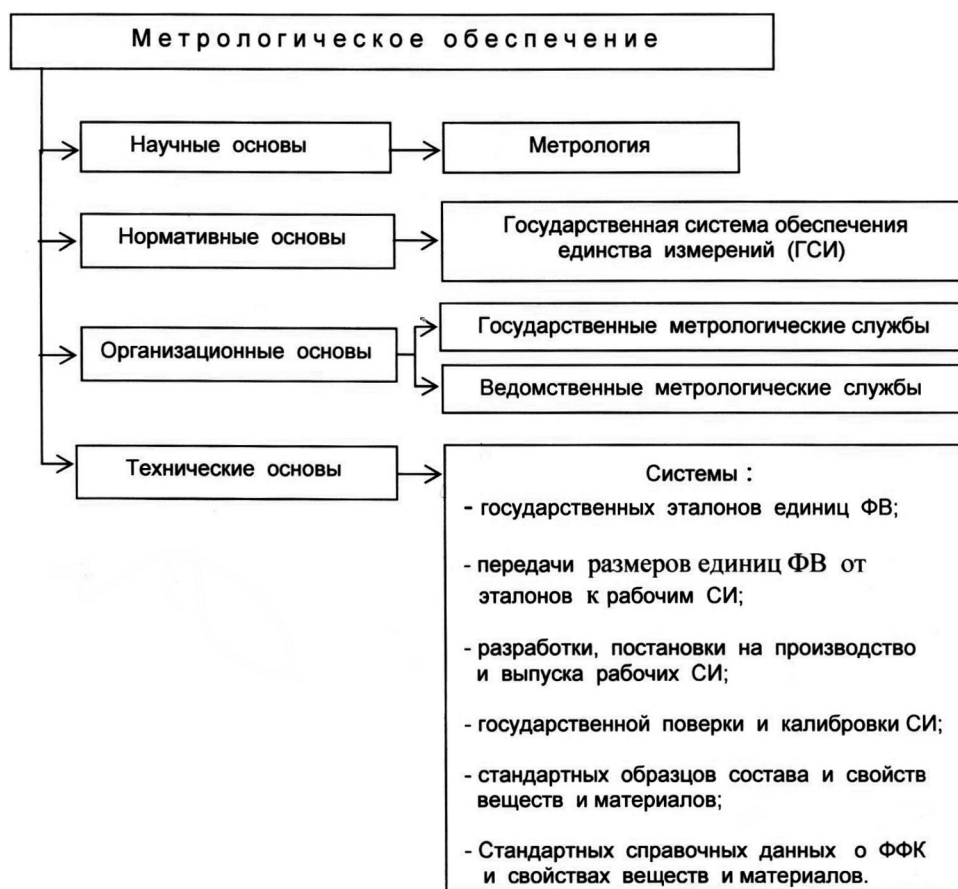


Рис. 1.6. Структура основ метрологического обеспечения

- проведение анализа состояния измерений, разработка на его основе и осуществление мероприятий по совершенствованию МО;
- информационное обеспечение специалистов по вопросам МО.

Таким образом, МО представляет достаточно сложную систему различных мероприятий, обеспечивающих качество и единство процесса измерений. Разработка и проведение мероприятий МО возложены на метрологические службы.

Выделяют следующие четыре основы МО: научную, организационную, нормативную и техническую. Содержание данных основ показано на рис. 1.6.

Научной основой МО является метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Нормативной основой МО является государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), охватывающая унификацию единиц ФВ и передачу их размеров с требуемой точностью, устанавливающая комплекс правил, норм и требований для обеспечения единства измерений.

Организационной основой МО являются государственные, региональные и ведомственные метрологические службы РФ.

Техническую основу МО представляют вторичные и рабочие эталоны, стандартные образцы, средства поверки и калибровки.

ГЛАВА 2

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Принципы построения систем единиц физических величин

На начальной стадии количественного определения свойств веществ и предметов единицы измерений совпадали с вещественными мерами и выбирались произвольно, без какой-либо связи друг с другом. В различных странах, а иногда даже в каждом городе создавались свои единицы измерений. Для сравнения часто использовались размеры человеческого тела (локоть, ступня, ярд и т.п.). Разнобой и хаос в области мер и весов усложняли торгово-экономические отношения как в пределах отдельных стран, так и на международном уровне. Поэтому по мере развития техники и международных связей настоятельно возникла проблема *унификации* единиц измерений (в том числе дольных и кратных) и применения узаконенных мер.

Первые попытки установления узаконенных мер единиц проводились в наиболее развитых странах. Так, в Англии первые узаконенные меры впервые появились в 1494 году, а в XVII веке были установлены английские меры длины и веса. Во Франции в 1735 году была установлена единица длины туаз и изготовлен ее вещественный эталон. На Руси в XVI—XVII вв. в связи с укреплением государственной власти церковный надзор за «мерами и весами» постепенно уступил место государственному. При этом государственный надзор распространялся не только на отдельные княжества, но и на всю территорию страны.

В 1789 году в Национальное собрание Франции был внесен правительственный проект об установлении единых для всей страны мер длины и веса. Под председательством П. Лапласа специальная комиссия приняла в качестве единицы длины новую меру, основанную на использовании естественного стабильного эталона, — одну десятиmillionную часть четверти длины Парижского меридиана. Этой единице было присвоено название «метр». Для определения размера метра были проведены измерения дуги Парижского меридиана. В 1799 году был изготовлен и утвержден платиновый эталон метра. Метр положил начало созданию метрических мер и образованию кратных и дольных единиц, находящихся в десятичных соотношениях.

В то же время неуклонное развитие научно-технического прогресса требовало установления единиц для каждой из известных физических величин, их унификации и метрологического надзора как в отдельных странах, так и в международном масштабе. Это привело также к необходимости создания узаконенной совокупности единиц ФВ. При формировании совокупности единиц величин надо было учитывать, что многие ФВ связаны между собой определенными функциональными зависимостями. Существующая в природе взаимосвязь физических величин позволяла применить системный подход к единицам физических величин.

Первые понятие о системе единиц ФВ в 1832 году ввел немецкий ученый К. Гаусс. Первоначально такие системы базировались на трех единицах и условно назывались механическими. По предложению Гаусса при построении системы единиц произвольно выбирают несколько ФВ независимо друг от друга (например длину, массу и время). При этом единицы данных ФВ называют *основными*, а конкретно — миллиметр, миллиграмм и секунда. Остальные единицы устанавливаются на основе закономерной связи между ФВ и называются *дополнительными*.

Построение системы единиц по методу Гаусса (длина — масса — время) было одобрено учеными. Одновременно было предложено укрупнить сравнительно мелкие единицы и принять за основные единицы сантиметр, грамм и секунду. Так появилась система единиц СГС. По такой же схеме построена система метр — килограмм — секунда (МКС). На основе систем СГС и МКС были установлены также единицы для других областей механики и физики, а также определены единицы измерений для магнитных и электрических величин. Например, единице силы в системе СГС было присвоено название «дина», единице работы — название «эрг», а единице магнитной индукции — «гаусс».

В 1861 году Британской ассоциацией для развития наук был создан особый Комитет по электрическим эталонам, который охватывал очень широкий круг вопросов. Среди них образование двух одинаковых логических систем: электромагнитной СГСМ и электростатической СГСЭ.

В 1881 году I Международный конгресс электриков в Париже с участием А.Г. Столетова одобрил и принял обе системы единиц, разработанные Комитетом Британской ассоциации.

В дальнейшем на базе системы МКС с добавлением четвертой основной единицы получили развитие другие системы. Была создана

система единиц тепловых величин МКСК (метр, килограмм, секунда, кельвин). Разработана система светотехнических единиц МКСС (метр, килограмм, секунда, свеча) и система МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер). Остальные варианты систем с использованием тонны и килограмм-силы (МТС, МКГСС) были не столь удачными. В результате процесса унификации преобладающее значение получила система МКСА, в состав которой вошли электрические и магнитные величины.

Наряду с упорядочением единиц ФВ и созданием метрической системы мер и весов стала особенно актуальной проблема определения основных единиц и выбора или изготовления их вещественных эталонов. Как выяснилось со временем, измерение длины Парижского меридиана было недостаточно точным, так как Земля непрерывно меняет свои размеры. Кроме того, для эффективного обеспечения единства измерений на мировом уровне необходимо было решать задачи надзора и организации специальных метрологических поверочных служб.

В России особые заслуги в развитии отечественной и мировой метрологии принадлежат великому русскому ученому Д.И. Менделееву.

Он является создателем первого в России научного учреждения по метрологии — Главной палаты мер и весов (ныне ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»). Д.И. Менделеев умело использовал все положительные достижения, которые были получены в России его предшественниками О.В. Струве, Б.С. Якоби, А.Я. Купфером и В.С. Глуховым в области метрологии и метрологического обеспечения. Под его руководством была проведена подготовка к внедрению в России метрической системы мер. К концу 1900 года в крупных городах России были открыты первые 10 поверочных палаток. При этом была создана система поверки и инспекции, которая использовала положительный опыт Англии, Франции и Германии.

Однако следует отметить, что к началу XX в. существовало несколько систем единиц ФВ и большое число внесистемных единиц, что требовало пересчета при переходе от одной системы к другой и приводило к множеству неудобств при решении различных научно-технических и хозяйственных задач. Проблема унификации единиц снова стала актуальной.

Вопрос о создании единой международной системы единиц впервые был поднят еще в 1913 году на V Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) и завершился лишь в середине XX века. Так, в 1960 году на XI ГКМВ было принято решение создать универсальную систему единиц ФВ, охватывающую все области измерений,

и присвоить ей название «Международная система единиц». При этом были установлены основные и производные единицы и введена таблица приставок для образования десятичных кратных и дольных единиц. Система получила сокращенное название SI (от начальных букв *S*ysteme *I*nternational).

2.2. Международная система единиц физических величин

2.2.1. Основные и производные единицы системы

Международная система единиц (SI или СИ) разработана совместными усилиями ученых разных стран и является наиболее совершенной формой метрической (десятичной) системы мер. Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) рекомендовала всем государствам ввести систему единиц в законодательном порядке. Международная система единиц принята теперь более чем в 130 странах мира и признана многими влиятельными международными организациями, включая ООН, ЮНЕСКО, ИСО, МОЗМ, МЭК. При необходимости число основных единиц может быть еще увеличено для охвата какой-либо дополнительной области явлений. Она сделала ненужными многочисленные системы единиц, применявшиеся еще несколько десятилетий назад. В России данная система впервые была введена в 1963 году (ГОСТ 9867-61). В настоящее время единицы величин, применяемых в нашей стране, устанавливает основополагающий стандарт ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы физических величин».

К основным характеристикам системы единиц СИ следует отнести:

- универсальность, т.е. охват всех областей науки и техники;
- унификацию всех областей и видов измерений;
- возможность воспроизведения единиц ФВ с высокой точностью для существующего уровня измерительной техники;
- когерентность (согласованность) системы единиц, т.е. свойство, при котором производные единицы всех величин могут быть получены с помощью уравнений с численными коэффициентами, равными единице;
- гибкость, допускающую применение некоторого числа внесистемных единиц;

- единую систему образования кратных и дольных единиц, имеющих собственное название;
- упрощение записи формул;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и торгово-экономических связей между различными странами.

В состав Международной системы единиц входят основные и производные, безразмерные производные единицы, кратные и дольные, внесистемные единицы, в ней также устанавливаются единицы величин, применяемые в международных договорно-правовых отношениях.

Основные единицы системы установлены в соответствии с условно принятыми основными независимыми физическими величинами. Основные единицы СИ с указанием размерности и сокращенных обозначений русскими и латинскими буквами приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Основные единицы Международной системы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая	θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Кроме термодинамической температуры, допускается применять также температуру Цельсия, определяемую выражением $t = \theta - \theta_0$, где $\theta_0 = 273,15$ К. По размеру градус Цельсия равен градусу Кельвина. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

Производные когерентные единицы (далее — производные единицы) Международной системы единиц, как правило, образуют с помощью простейших математических уравнений связи между величинами, в которых числовые коэффициенты равны 1. Исключение составляют некоторые характерные зависимости, в которых коэффициент

не равен 1 (например, при определении площади круга $S_0 = \pi r^2$ или кинетической энергии тела $mv^2/2$).

Для образования производных единиц обозначения ФВ в уравнениях связи заменяют обозначениями их единиц. При этом подстановка в уравнение основных единиц дает соответствующую производную единицу.

Например, единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки:

$$v = \frac{L}{T},$$

где v — скорость; L — длина пройденного пути; T — время движения материальной точки. Подстановка вместо L и T обозначений их единиц СИ дает

$$[v] = [L] / [T] = 1 \text{ м/с}.$$

Следовательно, единицей скорости является метр в секунду.

В общем случае *уравнение размерности* ФВ может быть представлено в следующем виде:

$$[Q] = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\varepsilon \theta^\eta N^\mu J^\lambda, \quad (2.1)$$

где L, M, T, I, θ, J — величины, единицы измерения которых приняты за основные; $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \eta, \mu, \lambda$ — показатели степени, в которой данная величина входит в уравнение.

Пример 2.1

Найти размерность единицы давления P , которое определяется силой F , действующей на единицу поверхности $P = F/S_0$, где $F = m \cdot a$. Подставляя значения единиц, получим

$$P = \frac{ma}{S_0} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}.$$

Откуда $[P] = L^{-1}MT^{-2}$ или $[\text{Па}] = \text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$.

Пример 2.2

Найти размерность единицы работы, которая определяется уравнением $A = F \cdot L$, где L — длина плеча приложения силы. Подставляя значения единиц в формулу работы $A = m \cdot a \cdot L$, получим

$$A = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}.$$

Откуда $[A] = L^2MT^{-2}$ или $[\text{Дж}] = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$.

Пример 2.3

Найти размерность ед. мощности, которая определяется уравнением $W = (F \cdot L)/t$, где t — время. Подставляя значения единиц в формулу мощности $W = (m \cdot a \cdot L)/t$, получим $[W] = L^2 M T^{-3}$ или $[Вт] = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$.

Аналогично можно получить размерности единиц других производных ФВ: электрической емкости $L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$, молярной концентрации $L^{-3} N$, электрического напряжения $L^2 M T^{-3} I^{-1}$ и т.д.

Примеры размерности других единиц, обозначения которых основано на использовании наименований и обозначений основных единиц СИ, показаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Наименования и обозначения единиц СИ

Величина		Единица		
Наименование	Раз- мерность	Наименование	Обозначение	
			между- народное	русское
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	$м^2$
Объем, вместимость	L^3	кубический метр	m^3	$м^3$
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	m/s	$м/с$
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	$м^{-1}$
Плотность	$L^{-3} M$	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
Удельный объем	$L^3 M^{-1}$	кубический метр на килограмм	m^3/kg	$м^3/кг$
Плотность электрического тока	$L^{-2} I$	ампер на квадратный метр	A/m^2	$А/м^2$
Напряженность магнитного поля	$L^{-1} I$	ампер на метр	A/m	$А/м$
Молярная концентрация компонента	$L^{-3} N$	моль на кубический метр	mol/m^3	$моль/м^3$
Яркость	$L^{-2} J$	кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$

Ряд производных единиц СИ, имеющие *специальные* наименования и обозначения, приведены в табл. 2.3. Эти единицы также могут быть использованы для образования других производных единиц системы и часто носят названия ученых.

Таблица 2.3. Наименования и обозначения производных единиц

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Плоский угол	l	радиан	rad	рад
Телесный угол	l	стерадиан	sr	ср
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц
Сила	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт
Электрический заряд, количество электричества	TI	кулон	C	Кл
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность потенциалов, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В
Электрическая емкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	F	Ф
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ω	Ом
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	S	См
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Wb	Вб
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	T	Тл
Индуктивность, взаимная индукция	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	H	Гн
Температура Цельсия	θ	градус Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Световой поток	J	люмен	lm	лм
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	lx	лк
Активность радионуклида	T^{-1}	беккерель	Bq	Бк
Поглощенная доза ионизирующего излучения, керма	$L^2 T^{-2}$	грей	Gy	Гр
Эквивалентная доза ионизирующего излучения	$L^2 T^{-2}$	зиверт	Sv	Зв
Активность катализатора	NT^{-1}	катал	kat	кат

Производные *безразмерные* единицы СИ радиан и стерадиан в основном используются для образования единиц угловой скорости, углового ускорения, а также углов (например, $l = 2\pi$ — полный угол, $l = \pi/2$ — прямой угол) и некоторых других величин при теоретических расчетах.

Р а д и а н — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна этому радиусу ($1 \text{ радиан} = 180^\circ/\pi \approx 57^\circ,2958 \approx 57^\circ 17'45''$).

С т е р а д и а н — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на ее поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы. Измеряют телесные углы путем определения плоских углов по расчетной формуле

$$\alpha = 2\pi [1 - \cos (\varphi/2)], \quad (2.2)$$

где α — телесный угол; φ — плоский угол при вершине конуса, образованного внутри сферы данным телесным углом.

Некоторые примеры производных единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием основных единиц и со специальным наименованием, приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Специальные наименования производных единиц

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Выражение через основные и производные единицы СИ
			международное	русское	
Пространственная плотность электрического заряда	$L^{-3}TI$	кулон на кубический метр	C/m ³	Кл/м ³	m ⁻³ ·с·А
Электрическое смещение	$L^{-2}TI$	кулон на квадратный метр	C/m ²	Кл/м ²	m ⁻² ·с·А
Напряженность электрического поля	$LMT^{-3}I^{-1}$	вольт на метр	V/m	В/м	m·кг·с ⁻³ ·А ⁻¹
Диэлектрическая проницаемость	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	фарад на метр	F/m	Ф/м	m ⁻³ ·кг ⁻¹ ·с ⁴ ·А ²
Магнитная проницаемость	$LMT^{-2}I^{-2}$	генри на метр	H/m	Гн/м	m·кг·с ⁻² ·А ⁻²
Удельная энергия	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг	m ² ·с ⁻²
Теплоемкость системы, энтропия системы	$LMT^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на кельвин	J/K	Дж/К	m ² ·кг·с ⁻² ·К ⁻¹
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	$LT^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на килограмм-кельвин	J/(кг·К)	Дж/(кг·К)	m ² ·с ⁻² ·К ⁻¹

Окончание табл. 2.4

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Выражение через основные и производные единицы СИ
			между- народное	русское	
Поверхностная плотность потока энергии	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	W/m ²	Вт/м ²	kg·s ⁻³
Теплопроводность	$LMT^{-3}\theta^{-1}$	ватт на метр-кельвин	w/(m·K)	Вт/(м·К)	m·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹
Молярная внутренняя энергия	$L^2MT^{-2}N^{-1}$	джоуль на моль	J/mol	Дж/моль	m ² ·kg·s ⁻² ·mol ⁻¹
Молярная энтропия, молярная теплоемкость	$L^2MT^{-2}\theta^{-1}N^{-1}$	джоуль на моль-кельвин	J/(mol·K)	Дж/(моль·К)	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹ × × mol ⁻¹
Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза гамма- и рентгеновского излучений)	$M^{-1}TI$	кулон на килограмм	C/kg	Кл/кг	kg ⁻¹ ·s·A
Мощность поглощенной дозы	L^2T^{-3}	грей в секунду	Gy/s	Гр/с	m ² ·s ⁻³

Обозначения производных единиц системы, не имеющих специальных наименований, должны содержать минимальное число обозначений единиц (специальных и основных) с возможно более низкими показателями степени, например:

правильно: неправильно:

A/kg; A/кг C/(kg·s); Кл/(кг·с);
 $\Omega \cdot m$; Ом·м V·m/A; В·м/А;
 $M^3 \cdot kg/(s^3 \cdot A^2)$ м³·кг/(с³·А²).

При переходе на единицы СИ в ряде случаев происходит изменение коэффициентов в расчетных формулах. Примером может служить переход от нерационализируемой формы уравнений электромагнитного поля к рационализируемой.

2.2.2. Кратные и дольные единицы

Кратные и дольные единицы СИ образуют с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 2.5. В связи с тем что наименование