

И.Г.Зедгинидзе

МЕТРОЛОГИЯ



И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

И.Г. Зедгинидзе

**МЕТРОЛОГИЯ
И
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Технический университет
«Центр информатизации»
Тбилиси 2006

90-летию со дня рождения выдающегося грузинского метролога, организатора крупнейшего в Кавказском регионе метрологического центра, а также создателя кафедры Информационно-измерительной техники Грузинского политехнического института *Зедгинидзе Георгия Платоновича* посвящается

УДК 389.001
3 445

Зедгинидзе И.Г. **Метрология и метрологическое обеспечение:**
Учебное пособие. – Тбилиси: Технический университет – «Центр информатизации», 2006.- 109 с.

Рассмотрены основные понятия метрологии, единицы физических величин, системы единиц физических величин, вопросы воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров, методы измерений, погрешности измерений, метрологическое обеспечение средств измерений.

Учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению «Управление качеством и измерительная техника». Оно безусловно будет также полезно для студентов высшего профессионального обучения, обучающихся по направлению «Информационная техника и информационные технологии», а также других направлений и специальностей Грузинского технического университета.

Рецензенты:

Академик Инженерной академии Грузии
лауреат Государственной премии,
доктор технических наук, профессор *В.А. Долидзе*

Кандидат технических наук,
ассоциированный профессор *Р.М. Жвания*

ISBN 99928-18-35-2

© Технический университет-
«Центр информатизации», 2006

1. ВВЕДЕНИЕ

При современном уровне развития цивилизации каждый человек в практической жизни как дома, так и на производстве повседневно сталкивается с измерениями, измерительной техникой и метрологией. Подсчитано, например, что в среднем каждый из нас производит в день от 15 до 50 измерений, определяя время по часам, скорость по спидометру и т.д. В масштабах государства это выливается в проведение ежесуточно в различных областях – науке, промышленности, торговле, повседневной жизни – более 20 миллиардов различных измерений, выполняемых миллионами людей. Капиталовложения в средства измерений и испытаний составляют сотни миллиардов рублей.

Измерения, являющиеся одним из важнейших путей познания природы человеком, дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая действующие в природе закономерности. Установление закономерных зависимостей посредством измерений является основной задачей всех научных лабораторий, которые занимаются, например, физическими, физико-химическими, химическими, биологическими, физиологическими и др. проблемами. Значение измерений для познания природы и науки основоположник русской метрологии Д.И. Менделеев выразил следующим образом: «Наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять. Точная наука нелегима без меры».

Измерения являются необходимым условием развития техники и промышленности, всего народного хозяйства страны. Без измерений физических величин, технических параметров, характеристик процессов, состава и свойства вещества невозможно проведение испытаний и контроля продукции, проведение контроля и регулирования технологических процессов. Немыслим без измерений также и учет всех ценностей, добываемых, производимых, распределяемых и расходующихся в государстве.

Несмотря на крайне широкий круг величин, подлежащих измерению, разнообразие методов и средств измерений, удалось выделить нечто общее, составляющее основу измерения, что и легло в основу следующего определения: *измерение* есть нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специаль-

ных технических средств. Информация о значениях измеряемых физических величин известна как **измерительная информация**.

Для проведения измерения необходимы средства измерения, с помощью которых осуществляется измерительный процесс, а также способ или метод измерения.

Область науки и техники, посвященная разработке и созданию теоретических основ измерения, способов измерения и технических средств измерения во всем их многообразии получила наименование **информационно-измерительной техники**. Добавление термина «**информационная**» подчеркивает основную цель измерения – получения информации в указанном смысле.

Уровень информационно-измерительной техники, как совокупности методов и средств получения полной и достоверной количественной информации о характеристиках веществ, материалов, физических явлений, технологических процессов определяет собой эффективность любых научных изысканий, темпы технического и научного прогресса страны. Информационно-измерительную технику – важнейшее орудие исследования – стали рассматривать в качестве «катализатора прогресса».

Теоретической основой информационно-измерительной техники является метрология.

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. К основным проблемам метрологии (от греческих слов «метрон» – мера, «логос» – учение) относятся: общая теория измерений, единицы физических величин и их системы, методы и средства измерений, методы определения точности измерений, основы обеспечения единства измерений, методы передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам измерений.

Важнейшей задачей метрологии является обеспечение единства и необходимой точности измерений.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений характеризуется близостью их результатов к истинному значению измеряемой величины.

В большинстве стран мира мероприятия по обеспечению единства и требуемой точности измерений (узаконение определенных единиц измерений, проведение регулярной поверки мер и измерительных приборов, находящихся в эксплуатации, испытания вновь выпускаемых средств измерений) установлены законодательно. Поэтому один из разделов метрологии называется **законодательной метрологией** и включает комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений.

Таким образом, можно выделить две равнозначные и взаимно связанные части метрологии – научную и прикладную. Они лишь совместно могут создать необходимые условия для успешного развития и совершенствования научных и законодательных основ информационно-измерительной техники.

Задачами научной метрологии являются:

- Разработка и совершенствование теоретических основ метрологии (разработка, усовершенствование и углубление общей теории измерений; разработка теорий погрешностей, преобразований, передачи информации, надежности средств измерения; разработка теоретических основ системы единиц и эталонов);

- Разработка новых принципов и методов измерения (разработка и совершенствование методов точных измерений физических величин; физические исследования с целью использования новейших достижений науки для создания новых методов измерения и средств измерения, в том числе и эталонных; повышение точности измерений);

- Создание и совершенствование научных основ единства мер и измерений в стране (создание и совершенствование эталонов, образцовых мер и измерительных средств; разработка поверочных схем, методики поверки и контроля средств измерения, нормативной документации в области информационно-измерительной техники, системы и методики контроля соблюдения стандартов, технических регламентов и условий в процессе производства изме-

рительных средств; создание научных основ государственных испытаний средств измерения);

- Создание и совершенствование научных основ государственной службы стандартных справочных данных и стандартных образцов (разработка методики и экспериментальное определение наиболее достоверных значений физических констант, стандартных методов определения свойств и состава веществ и материалов, методики метрологической оценки степени достоверности стандартных справочных данных, системы сбора, апробации, хранения и распространения стандартных справочных данных, методики приготовления и аттестации стандартных образцов);

- Создание и совершенствование научных основ государственной службы аттестации качества продукции (разработка научно обоснованных критериев оценки качества продукции, методики и принципов сбора, накопления и анализа данных, характеризующих качество различных групп материалов и изделий; разработка методики и контрольно-измерительных средств аттестации качества, системы и методики контроля соблюдения стандартов и технических условий в процессе производства; разработка и совершенствование теории надежности).

Задачами прикладной метрологии являются:

- Создание и совершенствование законодательных основ информационно-измерительной техники (узаконение терминов и определений, систем или совокупностей единиц, допущенных к применению в стране, системы эталонов, образцовых мер и измерительных средств, классов точности средств измерения, методики оценки точности измерений и средств измерения, стандартных справочных данных и в том числе значений физических констант, стандартных образцов, методики поверки и контроля средств измерения, методики контроля и аттестации качества продукции);

- Организация и осуществление государственной службы единства мер и измерений в стране (организация и осуществление государственных контрольных испытаний в процессе производства, государственных испытаний предлагаемых к производству новых средств измерения, периодической поверки средств измерения, находящихся в обращении; контроль за состоянием измерительного хозяйства предприятий; систематический сбор, накопление и

анализ данных, характеризующих качество средств измерения, находящихся в обращении);

- Организация и осуществление государственной службы стандартных справочных данных и стандартных образцов (сбор, апробация, хранение и распространение стандартных справочных данных; издание официальных справочников по константам и свойствам веществ и материалов; изготовление и выпуск стандартных образцов; организация и осуществление службы аттестации стандартных образцов и контроля их производства);

- Организация и осуществление государственной службы аттестации качества (организация и осуществление контроля за соблюдением стандартов и технических условий в процессе производства; систематический сбор, накопление и анализ данных, характеризующих качество выпускаемых в стране материалов и изделий; государственные испытания и аттестация качества продукции).

Приведенный перечень задач метрологии ни в коей мере не претендует на исчерпывающий и окончательный характер. Дело в том, что метрология, как наука об измерениях, находится еще на стадии становления и многие вопросы, связанные с определением ее содержания и задач, с принципами организации метрологической деятельности, ее взаимосвязи с естественными науками и областями народного хозяйства пока еще ожидают решения.

Но и те задачи, которые метрология в состоянии решать уже сегодня, показали ее определяющую роль для развития национальной экономики.

Оценив роль метрологии для развития национальной экономики, правительственные органы промышленно развитых стран стали уделять ее развитию все большее внимание. Во всех странах за последние годы принята серия законов, регламентирующих метрологическую деятельность в государственном масштабе. С каждым годом растут средства, выделяемые всеми странами на развитие работ по метрологии. Растет число и массовость организаций, занимающихся проблемами измерений.

Метрологическую деятельность в стране обычно координирует метрологическая служба.

Метрологическая служба представляет собой сеть государственных и ведомственных метрологических органов и их деятельность, направленную на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений в стране.

Метрологическая служба неразрывно и самым теснейшим образом связана с совершенствованием и развитием всей системы стандартизации. Метрология, с одной стороны, является по существу стандартизацией измерений; с другой стороны, - одной из основ стандартизации, обеспечивающей достоверность, сопоставимость показателей качества, закладываемых в стандарты, дающей методы определения и контроля таких показателей.

Метрологические подразделения принимают активное участие в разработке основополагающих и базовых стандартов Государственной системы обеспечения единства измерений – нормативной базы системы метрологического обеспечения народного хозяйства. Этими стандартами устанавливаются основные требования к стандартизованным методикам выполнения измерений и форме представления показателей их точности, номенклатура метрологических характеристик средств измерений и требования к методам и средствам поверки последних, основные положения по утверждению и применению эталонов и образцовых средств измерений и требования к общесоюзным поверочным схемам, общие положения метрологического обеспечения подготовки производства, включая осуществление метрологической экспертизы нормативно-технической документации.

Большое значение имеют стандарты Государственной системы стандартных справочных данных (ГСССД), регламентирующие общие требования к стандартным справочным данным, к организации и порядку их получения, аттестации и стандартизации, формы представления, способы оценки достоверности, методы и средства измерений, применяемые для их получения. Имеется также настоятельная необходимость в стандартизации терминологии в этой области.

Соблюдение стандартов возможно лишь при условии широкого применения средств и методов измерительной техники, которые в состоянии обеспечить единство и необходимую точность измерений нужных физических величин. Без наличия точных средств измерения не может быть решена и проблема улучшения качества.

Средства измерений образуют основу информационно-измерительной техники.

Средствами измерений всех видов и назначений страну призвано обеспечивать приборостроение. Точнее, та часть этой обширной отрасли, которая тесно примыкает к метрологии и охватывает вопросы теории, расчета, изготовления элементов, звеньев и систем, используемых для выполнения измерений.

Рассматривая развитие информационно-измерительной техники в направлении создания специальных технических средств — средств измерения, следует иметь в виду как создание средств измерений для серийного и массового промышленного производства, так и производства в малых количествах и даже единичных, иногда уникальных устройств (научное приборостроение и средства измерений особо точные применительно к использованию их в особых условиях). Сложность и многообразие изучаемых явлений, высокая точность научных экспериментов приводят к необходимости создания все более разнообразных и высокочувствительных средств измерений, представляющих сложные комплексы, для построения которых используется весь арсенал современных достижений физики, химии, техники конструирования, материаловедения, технологии.

За последнее время наблюдается бурный рост приборостроительной промышленности развитых стран, увеличение удельного веса измерительных приборов в общем объеме производства, насыщение производства измерительной аппаратурой. Количественный рост средств измерений сопровождается и их качественными изменениями. Измерительные приборы непрерывно усложняются, появляется большое число специальных средств измерения.

Одним из прогрессивных направлений развития приборостроения является агрегатированный метод построения средств измерений (блочный принцип) и создание информационно-измерительных систем как самостоятельных измерительных устройств, так и важнейших элементов в различного рода автоматических системах управления, контроля и технической диагностики. Информационно-измерительные системы позволяют автоматически выполнять измерения различных физических величин по определенной программе в большом числе пунктов с передачей результатов измерения в один центр и обработкой их по заданной программе. Раз-

рабатываются измерительные устройства в сочетании с кибернетическими элементами, призванными осуществлять целый ряд логических операций (автоматическое введение поправок, усреднение значений величин и др.), измерительно-вычислительные комплексы.

Последний раздел информационно-измерительной техники охватывает вопросы применения и обслуживания средств информационно-измерительной техники.

На основании всего вышеизложенного можно прийти к заключению, что информационно-измерительная техника является в полном смысле слова всеобъемлющей как в отношении областей применения, так и объектов, которые ей приходится обслуживать.

Контрольные вопросы

1. Что такое измерение? Приведите примеры измерений, постоянно встречающихся в повседневной жизни.
2. Что такое измерительная информация и в чем заключается ее назначение?
3. Чему посвящена область науки и техники, получившая наименование информационно-измерительной техники?
4. Что является теоретической основой информационно-измерительной техники?
5. Каковы основные проблемы метрологии?
6. Что является важнейшей задачей метрологии?
7. Перечислите, из каких основных разделов состоит теоретическая метрология. Какие задачи в них решаются?
8. Перечислите основные задачи прикладной метрологии.
9. В чем заключаются задачи законодательной метрологии?
10. Что из себя представляет метрологическая служба?
11. Какова связь метрологии и приборостроения?

2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ СИСТЕМЫ

2.1. Физические величины и их измерение. Единицы измерений

Физическая величина (величина) – это свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что свойство может быть для каждого объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для

другого. Так, все тела обладают массой и температурой, но для каждого из них эти параметры различны. То же самое можно сказать и о других величинах – длине, времени, скорости, силе, электрическом сопротивлении, напряженности электрического поля, периоде колебаний или вязкости жидкостей.

Термин «величина» применяется только в одном смысле, как понятие, включающее и количественное и качественное содержание. Не следует применять термин «величина» для выражения только количественной стороны рассматриваемого свойства, например, писать «величина массы», «величина давления», «величина силы» и т.д., так как эти свойства (масса, давление, сила) сами являются величинами. Говоря «величина массы», мы по существу говорим «величина величины» и т.д. В этих случаях, когда необходимо подчеркнуть, что речь идет о количественном содержании в данном объекте физической величины, следует употреблять термин «размер величины».

Размер физической величины (размер величины) – это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Имеет смысл говорить об отличии друг от друга размером, т.е. количественно лишь однородных величин. Однородными величинами называются частные реализации одной и той же величины (например, расстояние между атомами и расстояние от Земли до какой-либо звезды являются конкретными реализациями физической величины – длины. Масса электрона и масса Солнца – суть частные реализации физической величины – массы.

Сравнение размеров двух однородных величин производится в процессе измерения. *Измерение* – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Значение физической величины (значение величины) – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц (например, 15 кг – значение массы тела)..

Единица физической величины (единица величины) – физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное 1. Так, например, единицей длины является метр, единицей массы – килограмм, единицей времени – секунда и т.д.

Отвлеченное число, входящее в значение физической величины (в нашем примере – 15), называется числовым значением. Следовательно, числовое значение – это отвлеченное число, равное отношению измеряемой величины к единице ее измерения.

Различают **истинное значение физической величины** (истинное значение величины), т.е. значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта и **действительное значение физической величины** (действительное значение величины), т.е. значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Между размером и значением величины имеется принципиальная разница. Размер величины существует реально, независимо от того, знаем мы его или нет. Он может быть выражен при помощи любой из единиц данной величины, иначе, при помощи числового значения.

Для числового значения характерным является то, что при применении другой единицы оно изменяется, в то время как физический размер величины неизменен.

Если Q – измеряемая величина, u_1 – единица измеряемой физической величины, а q_1 – числовое значение измеряемой величины в принятой единице, то основное уравнение измерения будет иметь вид

$$Q = q_1 u_1.$$

Размер величины Q не зависит от выбора единицы измерения, но в таком случае, выбрав для выражения размера величины Q другую единицу $u_2 (u_2 \neq u_1)$, мы должны получить и другое числовое значение

$$Q = q_2 u_2,$$

где $q_2 \neq q_1$. Например, если длина тела при измерении в метрах выражается числом 3 м, то при измерении в сантиметрах, она выразится числом 300 см. Размер метра в 100 раз больше размера

сантиметра, а численное значение результата измерений в метрах получается в 100 раз меньше, чем при измерении сантиметром.

Если в приведенных основных уравнениях измерения принять $q=1$, то размеры единиц будут

$$Q_1 = lu_1 \text{ и } Q_2 = lu_2.$$

Размеры разных единиц одной и той же величины различны. Так, размер метра отличается от размера фута и дюйма, размер килограмма – от размера фунта, пуда и т.п.

Последовательность значений, присвоенная в соответствии с правилами, принятыми по соглашению, последовательности одноименных физических величин различного размера называется **шкалой физической величины** (шкалой величины). В качестве примера можно назвать международную практическую температурную шкалу, шкалу твердости и др.

2.2. Уравнения связи между физическими величинами.

Размерность физических величин

Между некоторыми физическими величинами существуют качественные и количественные зависимости, закономерные связи. Совокупность физических величин, связанных между собой зависимостями, называется **системой физических величин** (системой величин).

Зависимости между физическими величинами могут быть выражены в виде математических формул. Образование таких формул связано с математическими действиями над физическими величинами. В общем случае физическая величина X с помощью математических действий может быть выражена через другие физические величины $A, B, C, \dots$ уравнением вида

$$X = kA^\alpha B^\beta C^\gamma \dots,$$

где k – коэффициент пропорциональности, а $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – показатели степени, каждый из которых может быть положительным или отрицательным целым или дробным числом или нулем.

Формулы вышеприведенного вида, выражающие одни физические величины через другие, называются уравнениями между физическими величинами (например, $F = ma$; $p = FS^{-1}$). Уравнения между величинами могут выражать физические законы или

служить определениями новых величин. Для построения системы единиц и введения понятия о размерностях величин целесообразно рассматривать некоторые величины системы физических величин как основные, не зависящие от других. Тогда остальные величины можно рассматривать как производные, определяемые через основные.

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

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

Какие именно величины выбрать за основные, зависит от рассматриваемой области физики. Так, например, для механики обычно выбирают в качестве основных величин длину l , массу m и время t (система величин механики LMT); в системе, охватывающей механические и электрические величины (системе величин LMTI) в качестве основных величин приняты длина l , масса m , время t и сила электрического тока i .

Выбор основных величин позволяет ввести понятие о размерности.

Размерность физической величины (размерность величины) – выражение, отражающее связь величины с основными величинами системы, в котором коэффициент пропорциональности принят равным 1. Размерность величины представляет собой произведение основных величин, возведенных в соответствующие степени.

Так, например, сила в системе величин LMT имеет размерность LMT^{-2} , магнитный поток в системе величин LMTI имеет размерность $L^2MT^{-2}I^{-1}$.

Показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящая в размерность производной величины, называется **показателем размерности физической величины** (показателем размерности). При четырех указанных выше основных величинах системы LMTI размерности ($\dim$ – от слова dimension, обозначающего в переводе размерность) имеют вид

$$\dim X = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta},$$

где L, M, T, I – размерности основных величин (длины, массы, времени, силы электрического тока), именуемые основными размер-

ностями; α, β, γ и δ – показатели размерности рассматриваемой величины X по отношению к длине, массе и т.д.

Величина, в размерности которой хотя бы одна из основных величин возведена в степень, не равную нулю, называется **размерной физической величиной** (размерной величиной).

Величина, в размерность которой основные величины входят в степени, равной нулю, называется безразмерной физической величиной (безразмерной величиной). Величина, безразмерная в одной системе величин, может быть размерной в другой системе, например, диэлектрическая проницаемость (абсолютная) в электростатической системе LMT является безразмерной величиной, в то время как в электромагнитной системе LMT ее размерность равна $L^{-2}T^2$, а в системе LMTI – $L^{-3}M^{-1}T^4I^2$.

Размерность производной величины отражает, во сколько раз изменяется ее размер при изменении размеров основных величин, например, если размерность величины X равна $L^\alpha M^\beta T^\gamma$ и длина изменяется от l до l' , масса от m до m' и время – от t до t' , то новый размер величины X будет больше прежнего в $(l'/l)^\alpha (m'/m)^\beta (t'/t)^\gamma$ раз.

Размерность не отражает всех качественных особенностей величин и прежде всего ее связи с конкретной системой физических величин. Например, размерность L означает длину вообще, но ничего не говорит о том, является ли эта длина пройденным путем, высотой, шириной и т.д. Встречаются также и различные величины с одинаковой размерностью, например, работа и момент (L^2MT^{-2}), кинематическая вязкость и температуропроводность (L^2T^{-1}), сила тока и намагничивающая сила (I), объем и статический момент площади и т.д. Следовательно, размерность дает лишь частичное представление о характере величины.

Понятие размерности имеет ряд полезных приложений, в частности при образовании единиц измерений производных величин, в теории физического подобия, при проверке сложных выводов.

2.3.Классификация единиц измерения. Системы единиц и принципы их построения

Выбрав основные величины и систему уравнений для определения интересующих производных величин, можно построить систему единиц.

Система единиц физических величин (система единиц) – совокупность основных и производных единиц, относящаяся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами. Примерами системы единиц являются система единиц СГС, система единиц МКСА, Международная система единиц (СИ).

Основной единицей физической величины (основной единицей) называется единица основной физической величины, выбранная произвольно при построении системы единиц. Например, в системе единиц МКС, соответствующей системе величин LMT, основными единицами являются метр, килограмм и секунда.

Производной единицей физической величины (производной единицей) называется единица производной физической величины, образуемая по определяющему эту единицу уравнению из других единиц данной системы единиц. Например, 1 м/с – единица скорости МКС.

Производная единица, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1, называется **когерентной производной единицей физической величины** (когерентной единицей). Так, например, вышеупомянутая единица скорости 1 м/с образована по уравнению связи между единицами $[v] = [l][t]^{-1}$, где $[l] = 1 \text{ м}$, $[t] = 1 \text{ с}$, и поэтому является когерентной единицей.

Система единиц, все производные единицы которой когерентны, называется **когерентной системой единиц физических величин** (когерентной системой единиц). В когерентной системе единиц системными являются основные и когерентные производные единицы.

Единица, не входящая ни в одну из систем единиц, называется **внесистемной единицей физической величины**. Примерами внесистемных единиц являются единица мощности – лошадиная сила, единица давления – миллиметр ртутного столба и др.

Вопрос о том, как определить единицу измеряемой величины, вообще говоря, может быть решен произвольно. Именно так, без

какой-либо связи друг с другом, выбирались единицы физических величин ранее. Развитие науки и техники, нужды хозяйства и торговли приводили с течением времени к появлению все новых и новых единиц для измерения одной и той же физической величины. Так, например, в XVIII веке в Европе существовало до сотни различных футов, около полусотни различных миль, свыше 120 различных фунтов.

Множественность единиц создавала трудности при сравнении результатов измерений, произведенных различными наблюдателями, препятствовала расширению международных связей, тормозила научно-технический прогресс. Необходимо было унифицировать и узаконить множество существующих единиц измерений.

С этой целью виднейшим французским ученым того времени: Лагранжу, Лапласу, Монжу и др. французским Национальным собранием в 1799 году было поручено разработать научные основы новой системы, названной впоследствии метрической. Главные идеи, положенные в основу этой системы, состояли в том, чтобы, во-первых, ликвидировать многообразие единиц и мер, существовавших в различных странах, и в первую очередь во Франции, а во-вторых, создать систему по своей сути международную, пригодную «на все времена, для всех народов». Эти ученые установили, во-первых, необходимость применения в будущей метрической системе единиц десятичных подразделений, и, во-вторых, принцип, по которому в основе системы должна быть единица, взятая из природы, дабы систему могли принять все науки. Гюйгенс предлагал взять за основу длину секундного маятника (если принять полупериод колебания маятника, равный одной секунде, то длина такого маятника составит почти метр), но ввиду различия в значениях ускорения силы тяжести в различных пунктах земного шара, после долгих дискуссий и обсуждений было решено взять за основу одну десятимиллионную долю четверти парижского меридиана, названную метром.

Таким образом, основой для системы послужила естественная единица. Масса одного кубического дециметра дистиллированной воды при температуре ее наибольшей плотности ($+4^{\circ}\text{C}$) была принята за единицу массы – килограмм. От метра были произведены единицы площади – квадратный метр и объема – кубический метр.

Интересно отметить, что несмотря на высокую прогрессивность системы, несмотря на двукратное решение об ее введении: сначала Национальным собранием Франции в мае 1791 года, а затем утверждения метра международной комиссией в 1795 году – при практическом введении метрической системы государственные деятели Франции чинили всевозможные препятствия для ее внедрения. Так, например, Наполеон считал, что «нет ничего более противоречащего складу ума, памяти и соображению – все что предлагают эти ученые».

Лишь в 1837 году метрическая система была, наконец, принята во Франции. В 1849 году ее принимает Испания, в 1868 году – Германия. Метрическая система быстро распространилась во многих странах мира, но внедрялась постепенно, со второй половины прошлого века, после принятия в 1875 году Метрической конвенции. Между 1870 и 1889 годами метрическую систему принимают в Австро-Венгрии, Турции, Греции, Румынии, Швеции, Норвегии, Болгарии, Бразилии и Мексике. И только Англия и Россия в Европе и Соединенные Штаты в Америке продолжали пользоваться своими собственными системами единиц.

Вопрос о введении в России метрической системы многократно ставился на повестку дня, начиная с середины XIX века. Однако консерватизм и недалекость царского правительства не позволили провести эту реформу. Лишь 14 сентября 1918 года метрическая система введена Декретом правительства Советской республики как обязательная. Метрическая реформа в СССР была в основном завершена в 1937 году.

Мировой системой метрическая система становится с середины XX века после принятия ее крупнейшими странами Азии: Японией в 1951 г., Индией в 1956 г., Китаем в 1959 г., Пакистаном в 1967 г. В настоящее время метрическая система принята в большинстве государств мира. В одних странах международная метрическая система принята как обязательная, в других как факультативная.

Кроме единиц, производных от метра и килограмма, в метрическую систему входили единицы, имеющие особые наименования, такие как ар – единица площади для земельных участков, литр – единица вместительности мер как для жидких, так и для сыпучих веществ, впоследствии к ним была добавлена тонна, равная 1000

кг. Существенным преимуществом метрической системы явилась десятичность построения метрических единиц. Для образования наименований десятичных кратных и дольных единиц были введены приставки кило, гекто, дека, деци, санти и милли.

Таким образом, метрическая система была первой системой связанных между собой единиц для измерения массы, длины, площади и объема. В своем первоначальном виде она содержала 5 наименований единиц и 6 десятичных приставок.

Понятие о системе единиц измерения физических величин и методика ее построения были даны немецким ученым К. Гауссом в 1832 году. По методу Гаусса для построения системы единиц произвольно выбирают ограниченное число независимых единиц, которые называются основными. При помощи основных единиц, пользуясь уравнениями, связывающими между собой физические величины, определяют единицы всех остальных величин. Эти величины называют производными. Полная совокупность основных и производных единиц, построенных по этому принципу, представляет собой систему единиц физических величин.

Согласно Гауссу, при построении системы единиц в качестве основных можно выбрать любые величины. Однако выбор основных величин должен определяться исключительно соображениями эффективности и целесообразности. Обычно в качестве основных величин системы выбирают наиболее важные, фундаментальные величины, которые могут быть воспроизведены с наибольшей, возможной при данном уровне техники точностью. Естественно, что величины как основных, так и производных единиц должны быть удобны для практического применения. Выбор основных единиц должен удовлетворять требованию когерентности (связанности), т.е. во всех формулах, определяющих производные единицы в зависимости от основных, коэффициент должен быть равен единице.

Основной единицей длины Гаусс предложил считать миллиметр, массы – миллиграмм, а времени – секунду. Системы единиц, построенные по принципу Гаусса с тремя основными единицами – массы, длины и времени, получили название абсолютных систем единиц.

Метрическая система мер, несмотря на большое положительное значение, не решила вопрос о полной унификации единиц

измерений. Развитие этой системы привело к созданию системы единиц: СГС, МТС, МКГСС, МКС, МКСГ, МКСА, МСС.

Система СГС – это система единиц сантиметр-грамм-секунда. Система СГС была принята в 1881 году на Первом Международном конгрессе электриков.

Для электрических и магнитных величин существует семь различных видов систем, построенных на основе системы СГС:

СГСЭ – система единиц сантиметр-грамм-секунда электростатическая (построена на трех основных единицах системы СГС). Диэлектрическая проницаемость вакуума принимается равной безразмерной единице. Применяя уравнения электричества и магнетизма, можно вывести в качестве производных единиц системы СГСЭ единицы всех электрических и магнитных величин. Однако производные единицы этой системы оказались неудобными для практических целей.

СГСМ – система единиц сантиметр-грамм-секунда электромагнитная (построена на трех основных единицах системы СГС). Магнитная проницаемость вакуума принимается равной безразмерной единице. Производные единицы этой системы также неудобны для практических целей.

СГС – система электрических и магнитных единиц, объединяющая две системы – СГСЭ и СГСМ. Она названа системой Гаусса или симметричной, так как электрические единицы в ней совпадают с электрическими единицами СГСЭ, а магнитные – с магнитными единицами СГСМ.

СГС ε_0 – система единиц, в которую кроме трех основных единиц – сантиметр, грамм, секунда входит одна электрическая основная единица – диэлектрическая проницаемость вакуума.

СГС μ_0 – система единиц, в которую кроме трех основных единиц – сантиметр, грамм, секунда входит одна электрическая основная единица – магнитная проницаемость вакуума.

СГС Φ – система единиц, в которую кроме трех основных единиц – сантиметр, грамм, секунда входит электрическая основная единица – единица заряда франклин. Франклин – единица такого электрического заряда, который действует на равный заряд на расстоянии 1 сантиметра в вакууме с силой в 1 дину.

СГСБ – система единиц, в которую кроме трех основных единиц – сантиметр, грамм, секунда входит электрическая основная единица – единица силы тока био. Био – постоянная сила тока, которая, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, помещенным на расстоянии 1 сантиметра друг от друга в вакууме, образует между этими проводниками силу 2 дины на 1 сантиметр длины. Системы СГСФ и СГСБ практически не применяются.

Система МТС – система единиц механических величин. Основными единицами являются метр, тонна, секунда. Важнейшие производные единицы системы: стен, стенметр (или килоджоуль), пьеза. Система МТС в СССР была отменена в 1955 году.

Система МКГСС – система единиц механических величин. Основными единицами являются метр, килограмм-сила, секунда. Эта система известна как техническая система единиц.

Система МКС – система единиц механических величин. Основные единицы: метр, килограмм, секунда. Наиболее важными производными единицами системы являются единицы силы – ньютон, мощности – ватт.

Система МКСГ предназначена для измерения тепловых величин. Основные единицы: метр, килограмм, секунда, градус. Производными единицами системы являются единицы количества теплоты – джоуль, теплоемкости тела – джоуль на градус, теплового потока – ватт и др.

Система МКСА – система электрических и магнитных единиц, преимущественно распространенная в радиотехнике и электротехнике. Основными единицами являются: метр, килограмм, секунда, ампер. В системе применяются постоянные диэлектрической проницаемости вакуума и магнитная, равная магнитной проницаемости вакуума. Единицей количества электричества является кулон, электрического потенциала – вольт, электрической емкости – фарада, электрического сопротивления – ом, индуктивности и взаимной индуктивности – генри.

Система МСС – система единиц световых величин. Основными единицами являются: метр, секунда, свеча; производными – люмен, люкс, нит.

2.4. Международная система единиц (СИ)

Развитие метрической системы мер происходило в различных областях науки и техники как в нашей стране, так и за рубежом изолированно и стихийно, вследствие чего на ее основе возникло большое количество различных систем единиц измерения с весьма сложными зависимостями; для измерения некоторых физических величин вошли в употребление многие единицы различных систем и внесистемные единицы, имеющие сложные соотношения. Производные единицы образовывались не по единому правилу, а как произвольные сочетания единиц различных систем и внесистемных, а также кратных и дольных от них. В результате стало применяться множество единиц измерений с произвольно подобранными размерами, расчетные формулы обросли числовыми коэффициентами, которые зависели от выбора единиц. Это значительно усложнило выполнение научных и технических расчетов, преподавание и изучение научных дисциплин. Использование единиц, взятых из разных систем, часто приводит к искажению физического смысла закономерностей, выражаемых формулами.

В каждой отрасли техники стали применяться свои установленные комплекты (наборы) единиц, и даже авторы книг стали произвольно выбирать единицы сообразно своим привычкам или вкусам. Тратилось колоссальное время и энергия на пересчеты значений одних и тех же величин, выраженных в единицах разных систем или внесистемных единицах узкого применения. Никто не учитывал те огромные неоправданные потери, которые несет общество из-за необходимости изучать и запоминать множество единиц измерений, выбранных по различным, не связанным между собой принципам из соображений кажущегося удобства для отдельных, весьма узких участков той или иной области науки и техники, и оперировать с такими единицами.

При все возрастающем темпе научного прогресса появление новых разделов науки и отраслей техники, сохранение существующей практики бессистемного выбора новых единиц измерения могло привести в недалеком будущем к еще более сложному и запутанному комплексу единиц. Дальнейшее промедление с упорядочением единиц измерения оказалось недопустимым. Очевидной стала необходимость безотлагательного упорядочения единиц из-

мерений и перехода на единую универсальную систему единиц, охватывающую все отрасли науки и техники.

Такая система – Международная система единиц СИ – была разработана совместными усилиями крупных ученых многих стран при активном участии советских ученых и принята Одиннадцатой Генеральной конференцией по мерам и весам по согласованию с такими ведущими международными организациями, как Международная организация законодательной метрологии, Международная организация по стандартизации, Международный союз чистой и прикладной физики, Международный союз чистой и прикладной химии, Международная электротехническая комиссия, Международный астрономический союз и др.

В настоящее время в нашей стране проводится большая и важная работа по внедрению в науку, технику, народное хозяйство и преподавание универсальной Международной системы единиц СИ. Переход на эту систему даст стране огромные выгоды.

Международная система единиц СИ состоит из семи основных единиц: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, канделла, моль; двух дополнительных – радиан истерадиан; большого числа производных единиц из различных областей науки.

Единица длины – метр (м) – длина, равная расстоянию, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды.

Единица массы – килограмм (кг) – масса, равная массе международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия.

Единица времени – секунда (с) – время, равное $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Единица силы электрического тока – ампер (А) – 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.

Единица термодинамической температуры – кельвин (К) – $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Единица силы света – канделла (кд) – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Единица количества вещества – моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде 12 массой 0,0012 кг.

Дадим определение двух дополнительных единиц системы СИ.

РадIAN – это единица измерения плоского угла – угла между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу.

Стерaдиан – это единица измерения телесного угла – угла с вершиной в центре сферы, вырезающего на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Таблица 1

Обозначения основных единиц международной системы

Наименование величины	Единицы			
	Наименование	Обозначение		
		междуна- родное	русское	грузинс- кое
Длина	метр	m	м	m
Масса	килограмм	kg	кг	kg
Время	секунда	s	с	wm
Сила электри- ческого тока	ампер	A	А	a
Термодинамичес- кая температура	кельвин	K	К	k
Сила света	канделла	cd	кд	kd
Количество вещества	моль	mol	моль	mol

Таблица 2

Обозначения дополнительных единиц международной системы

Наименование величины	Единицы			
	Наименование	Обозначение		
		междуна- родное	русское	грузинс- кое

Плоский угол	радиан	rad	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	sr	ср	sr

Производные единицы Международной системы единиц образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами или на основании определений физических величин. Выводятся соответствующие производные единицы СИ из уравнений связи между величинами (определяющих уравнений), выражающих данный физический закон или определение, если все другие величины выражены в единицах СИ.

Таблица 3

Некоторые производные единицы международной системы со специальными наименованиями

Величина		Единица				Выражение с помощью основных единиц
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение			
			международное	русское	грузинское	
Сила, вес	$LM\tau^{-2}$	ньютон	NN	НН	n	$m \cdot кг \cdot c^{-2}$
Давление		паскаль	PPa	Па	pa	$m^{-1} \cdot кг \cdot c^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж	j	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-2}$
Мошность, поток энергии	L^2MT^{-2}	ватт	W	Вт	vt	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-2}$
Электрическое напряжение	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В	v	$m^2 \cdot кг \cdot c^3 \cdot A^{-1}$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ω	Ом	o	$m^2 \cdot кг \cdot c^3 \cdot A^{-2}$
Электрическая емкость	$L^2M^{-1}T^4I^2$	фарада	F	Ф	f	$m^2 \cdot кг^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Электрическая индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	H	Гн	hn	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	lm	лм	lm	кд · ср
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	lx	лк	lq	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$

В наименованиях производных единиц, образованных как произведения единиц, склоняется только последнее наименование и относящееся к нему прилагательное «квадратный» или «кубический», например: момент силы равен пяти ньютон-метрам, магнитный момент равен трем ампер-квадратным метрам.

Наименования единиц, стоящих в знаменателе, пишутся с предлогом «на», например: метр на секунду в квадрате (единица ускорения), квадратный метр на секунду (единица кинематической вязкости), вольт на метр (единица напряженности электрического поля). Исключение составляют единицы величин, зависящих от времени в первой степени и характеризующих скорость протекания процесса; в этом случае наименование единицы, стоящей в знаменателе, пишется с предлогом «в», например: метр в секунду (единица скорости), радиан в секунду (единица угловой скорости), кубический метр в секунду (единица объемного расхода и объемной скорости).

При склонении наименований единиц, содержащих знаменатель, изменяется только числитель, по правилу, установленному выше для произведений единиц, например: ускорение, равное пяти тысячам метров на секунду в квадрате; удельная теплоемкость, равная четырем десятым джоуля на килограмм-кельвин.

В наименованиях единиц площади и объема применяются прилагательные «квадратный» или «кубический», например: квадратный метр, кубический миллиметр. Эти же прилагательные применяются и в случаях, когда единица площади или объема входит в производную единицу другой величины, например: кубический метр в секунду (единица объемного расхода), ньютон на квадратный метр (единица давления и механического напряжения).

Если же вторая или третья степень длины не представляет собой площади или объема, то в наименовании единицы вместо слов «квадратный» или «кубический» должны применяться выражения «в квадрате», «в третьей степени» и т.п., например: килограмм-метр в квадрате в секунду (единица момента количества движения), килограмм-метр в квадрате (единица динамического момента инерции), метр в третьей степени (единица момента сопротивления плоской фигуры).

Наименования единиц, входящих в произведение, при написании разделяются дефисом (короткой черточкой), например: ньютон-метр, ампер-квадратный метр, секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени.

Для написания значений величин предусматривается применять обозначения единиц буквами или специальными знаками (°, ', ", L, □°, °C, % , ‰), причем устанавливаются два вида буквенных обозначений: русские (с использованием букв русского алфавита) или международные (с использованием букв латинского или греческого алфавитов).

Допускается применять русские или международные обозначения. Одновременное применение в одном и том же издании обоих видов обозначений не допускается, за исключением публикаций по единицам физических величин.

Для буквенных обозначений единиц должен применяться шрифт текста, в котором они используются (прямой при прямом шрифте текста и наклонный – при наклонном). Обозначения единиц должны печататься строчными (малыми) буквами, за исключением обозначений единиц, наименования которых образованы по фамилии ученых. Эти обозначения должны начинаться с прописной (заглавной) буквы.

В обозначениях единиц точка как знак сокращения не применяется, за исключением случаев сокращения слов, которые входят в наименование единицы, но сами не являются наименованиями единиц, например: мм рт.ст. (миллиметр ртутного столба), л.с. (лошадиная сила – эта единица в настоящее время не применяется).

При написании обозначений производных единиц надлежит руководствоваться следующими правилами. Обозначения единиц, входящих в произведение, разделяются точками на средней линии как знаками умножения, например: Н·м (ньютон-метр), А·м² (ампер-квадратный метр), кг·м/с (килограмм-метр в секунду).

Для указания деления одних единиц на другие в качестве знака деления должна применяться косая черта, например: м/с. При этом все обозначения единиц помещают в строку.

Допускается применение горизонтальной черты (например, $\frac{м}{с}$) или обозначение единицы в виде произведения обозначений

единиц, возведенных в положительные и отрицательные степени (например: $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$).

При применении косой черты произведение единиц в знаменателе следует заключать в скобки, например: $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Не допускается в обозначении производной единицы применение более одной косой или горизонтальной черты: например, единицу коэффициента теплопередачи – ватт на квадратный метр-кельвин – следует обозначать $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Написание

этих обозначений в виде $\frac{\text{Вт}}{\frac{\text{м}^2}{\text{К}}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2/\text{К}$ и т.д. не допускается.

Обозначения единиц по падежам и числам не изменяются, за исключением обозначения св. год, которое в родительном падеже множественного числа принимает форму лет.

Обозначения единиц следует применять после числовых значений величин и помещать в строку с ними (без переноса на следующую строку). Между последней цифрой и буквенным обозначением единицы следует оставлять пробел.

При наличии десятичной дроби в числовом значении величины обозначение единицы следует помещать после всех цифр, например: 423,18 м; -156,73 °С; 56,23 с; 6,732°.

При указании значений величин с допусками или при перечислении нескольких значений следует приводить обозначение единицы не после каждого значения, а один раз и без применения скобок, например: $20 \pm 5^\circ\text{С}$ вместо $20^\circ\text{С} \pm 5^\circ\text{С}$ или $(20 \pm 5)^\circ\text{С}$; 2, 3 и 4 кг вместо 2 кг, 3 кг и 4 кг.

Допускается применять обозначения единиц в заголовках график и в наименованиях строк (боковиках) таблиц и выводов, а также пояснениях обозначений величин к формулам. Помещение обозначений единиц в строку с формулами, выражающими зависимости между величинами, не допускается.

До определенного времени допускается применение наравне с единицами СИ и таких единиц, как морская миля, центнер, тонна, киломоль, моль, минута, час, сутки, неделя, месяц, год, век, градус Цельсия, полный угол, прямой угол, градус, минута (угловая),

секунда (угловая), гон, гектар, литр, узел, километр в час, оборот в секунду, киловатт-час, литр в секунду, ампер-час, фон, распад в секунду, бел, децибел, октава, непер и др.

Эти единицы не входят в систему единиц СИ ни как основные, ни как производные, т.е. являются внесистемными. Внесистемные единицы, требующие приведения к соответствующим единицам системы СИ при проведении расчетов по формулам, являются определенной помехой к внедрению системы СИ. Однако на данном этапе пока нецелесообразно отказываться от их применения.

Единицы системы СГС, имеющие собственное наименование и другие единицы, применяемые в специальных разделах физики и астрономии: икс-единица, астрономическая единица длины, световой год, парсек (единица длины); грамм (единица массы), барн (единица площади), дина (единица силы, силы тяжести (веса)), эрг (единица работы, энергии), пуаз (единица динамической вязкости), стокс (единица кинематической вязкости), максвелл (единица магнитного потока), гаусс (единица магнитной индукции), гильберт (единица магнитодвижущей силы, разности магнитных потенциалов), эрстед (единица напряженности магнитного поля), электронвольт (единица электромагнитной энергии) и основанные на них единицы.

Единицы, допускаемые к применению временно лишь до 1 января 1975 г.: ангстрем, карат, килограмм-сила, калория, рад, бэр, рентген и основанные на них единицы, а также лошадиная сила, ватт-час, кюри.

Для практических целей весьма удобны кратные и дольные единицы физической величины.

Кратная единица физической величины (кратная единица) – единица, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы. Примерами таких единиц является километр (1000 метров), мегаватт (10^6 ватт), минута (60 секунд), килокалория (1000 калорий) и др.

Дольная единица физической величины (дольная единица) – единица, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы. Примерами дольных единиц является миллиметр (10^{-3} метра), микросекунда (10^{-6} секунды); угловая минута (1/60 углового градуса) и т.д.

В вышеприведенных определениях целое число должно соответствовать принятому в данной системе принципу образования кратных и дольных единиц.

При создании метрической системы мер был введен принцип образования кратных и дольных единиц, находящихся в десятичных соотношениях, путем присоединения приставок к наименованиям основных и производных единиц. Этот принцип сохранен в настоящее время.

В таблице 4 приведены множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования.

Таблица 4

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		
		международное	русское	грузинское
10^{18}	экса	E	Э	Ee
10^{15}	пета	P	П	Pp
10^{12}	тера	T	Т	t
10^9	гига	G	Г	Gg
10^6	мега	M	М	Mmg
10^3	кило	k	к	k
10^2	/гекто	h	г	h
10^1	дека	da	да	dk
10^{-1}	деци	d	д	d
10^{-2}	санتي	c	с	s
10^{-3}	милли	m	м	m
10^{-6}	микро	μ	мк	mk
10^{-9}	нано	n	н	n
10^{-12}	пико	p	п	pk
10^{-15}	фемто	f	ф	f
10^{-18}	атто	a	а	a

Наименования десятичных приставок взяты из греческого, латинского и датского (фемто, атто) языков.

При образовании десятичных кратных и дольных единиц следует руководствоваться следующими правилами.

Если наименование исходной единицы состоит из одного слова (например, метр, ампер, ньютон), то приставку пишут слитно с

наименованием исходной единицы (например, километр, миллиампер, меганьютон). Обозначение приставки пишется слитно с обозначением единицы, к которой она присоединяется (например, км, мА, МН).

Нельзя присоединять две и более приставок подряд. Например, вместо единицы «микромикрофарада» следует применять единицу «пикофарада». При образовании наименования десятичной кратной или дольной единицы от основной единицы СИ – килограмма, наименование которой уже содержит приставку, новую приставку присоединяют к простому наименованию, т.е. к наименованию «грамм». Например, миллиграмм $1 \text{ мг} = 10^{-3} \text{ г} = 10^{-6} \text{ кг}$; мегаграмм $1 \text{ Мг} = 10^3 \text{ кг} = 10^6 \text{ г}$.

В сложном наименовании, представляющем собой произведение единиц, приставку присоединяют к наименованию первой единицы, входящей в произведение. Например, 10^3 единиц момента силы – ньютон-метров ($10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$) следует именовать «килоньютон-метр» ($\text{кН} \cdot \text{м}$), а не «ньютон-километр» ($\text{Н} \cdot \text{км}$). Если сложное наименование соответствует отношению единиц, приставку также следует присоединить к наименованию первой единицы, входящей в числитель. Например, 10^3 единиц плотности потока энергии – ватт на квадратный метр (10^3 Вт/м^2) следует именовать «киловатт на квадратный метр» (кВт/м^2). Значение плотности потока энергии, равное 10^4 Вт/м^2 , следует выражать как 10 кВт/м^2 , но не как 1 Вт/см^2 . Исключением из этого правила является основная единица СИ – килограмм, которая может входить в знаменатель производной единицы без ограничения.

В необходимых случаях допускалось также применение в знаменателе дольных единиц длины, площади и объема: см, мм^2 , см^2 , мм^3 , см^3 и т.д. Например: В/см, г/см^3 , А/мм^2 .

Применение единиц с приставками одновременно в числителе и знаменателе не допускается.

Для образования наименований кратных и дольных единиц от единицы, представляющей собой степень некоторой исходной единицы, приставку присоединяют к наименованию исходной единицы. Например, квадратный сантиметр и т.д.

Обозначения единиц, представляющих собой степень исходной единицы, получаются возведением в соответствующую степень обозначения кратной или дольной от исходной единицы,

причем показатель степени при обозначении исходной единицы относится ко всему обозначению, например:

$$1 \text{ км}^2 = 1 (\text{км})^2 = (10^3 \text{ м})^2 = 10^6 \text{ м}^2;$$

$$1 \text{ см}^3/\text{с} = 1 (\text{см})^3/(1 \text{ с}) = (10^{-2} \text{ м})^3/(1 \text{ с}) = 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$1 \text{ см}^{-1} = 1 (\text{см})^{-1} = (10^{-2} \text{ м})^{-1} = 100 \text{ м}^{-1}.$$

Единицы СИ должны применяться в высших учебных заведениях при преподавании всех дисциплин.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение физической величины, размера физической величины, значения физической величины и единицы физической величины.

2. Приведите примеры физических величин, относящихся к механике, магнетизму и оптике.

3. В чем различие истинного и действительного значений физической величины?

4. Дайте определения системы физических величин, основной и производной физической величины.

5. Что такое размерность физической величины? Запишите размерность следующих физических величин: силы, мощности, энергии, электрического напряжения.

6. Дайте определение системы единиц физических величин. Приведите примеры основных и производных единиц физических величин.

7. Сформулируйте основные принципы построения систем единиц физических величин.

8. Перечислите преимущества международной системы единиц СИ.

9. Перечислите основные и дополнительные единицы системы СИ и дайте их определения.

10. Назовите производные единицы системы СИ, имеющие специальное название.

11. Какие внесистемные единицы допущены к применению наравне с единицами СИ?

12. Что вы знаете о кратных и дольных единицах физической величины?

13. Назовите приведенные значения физических величин, используя кратные и дольные приставки: $5,6 \cdot 10^{13}$ Гц; $3,48 \cdot 10^7$ Па; $10,5 \cdot 10^{13}$ Ом; 0,059 с; 0,0063 м; $4,38 \cdot 10^{-3}$ с; $5,96 \cdot 10^{-6}$ Ф; $47,8 \cdot 10^{-9}$ с; $15,4 \cdot 10^{-13}$ Ф.

3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ, ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Выбор и определение единиц физических величин (единиц измерения) еще не дают возможности выполнять практические измерения. Для этого каждая единица должна быть материализована, вещественно воспроизведена в свойстве некоторого физического объекта, чтобы с ним можно было сравнивать одноименные свойства других интересующих нас физических объектов, т.е. измерять физические величины. Однако воспроизведение единиц – это лишь первая часть задачи. Воспроизведенную единицу необходимо хранить и ее размер регулярно передавать всем применяемым в стране средствам измерений с целью достижения их единообразия.

Материально-технической базой воспроизведения и хранения единиц измерения, а также передачи размера единиц являются эталоны и образцовые средства измерений. Эталоны и образцовые средства измерений различаются как по точности, так и по назначению.

Эталоны служат для воспроизведения и хранения единицы измерения с метрологической точностью (с наивысшей достижимой при данном состоянии измерительной техники точностью). Они являются основой обеспечения единства и верности измерений.

Образцовые средства измерений служат лишь для хранения и передачи воспроизводимых эталонами единиц измерения от эталона до рабочих средств измерения, т.е. для распространения этих единиц по всей территории страны.

Соподчинение эталонов и образцовых средств измерений, а также методы и точность передачи единиц от эталонов образцовым, а от них рабочим средствам измерения регламентируется поверочными схемами.

3.1. Эталоны

Эталон единицы – это средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой

спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Эталоны классифицируются по нескольким признакам.

По соподчинению эталоны, воспроизводящие одну и ту же единицу, можно разделить на первичные и вторичные.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

Первичный эталон основной единицы должен воспроизводить единицу в соответствии с ее определением. Эталон, осуществляемый в соответствии с определением единицы, основанным на физических явлениях, воспроизводимых с высокой степенью точности (молекулярные и атомные явления), называется воспроизводимым («естественным» эталоном (эталон метра, секунды, ампера, градуса Кельвина, канделлы и моля), а в соответствии с определением, основанным на свойствах конкретных вещественных эталонов, – невоспроизводимым (вещественным или искусственным) эталоном (эталон килограмма).

В настоящее время созданы также первичные эталоны большого числа производных единиц, например, эталоны единиц силы, твердости, давления силы света, количества теплоты, электродвижущей силы, электрической емкости, электрического сопротивления, индуктивности, магнитной индукции, магнитного потока и др.

Первичные эталоны служат для воспроизведения единиц с наивысшей в настоящее время точностью.

Для воспроизведения единиц в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичных эталонов технически неосуществима с требуемой точностью (высокие, сверхвысокие частоты, энергии, давления, температуры, особые состояния вещества, крайние участки диапазона измерений и пр.) применяют специальные эталоны).

Специальный эталон – это эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. Единица, воспроизводимая с помощью специального эталона, по размеру должна быть согласована с единицей, воспроизводимой с помощью соответствующего первичного эталона.

Примерами специальных эталонов являются эталон единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 Па; эталон единицы напряжения переменного тока в диапазоне частот от 100 до 1500 МГц, эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,59 до 37,5 ГГц и др.

Первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны, называется **государственным эталоном**. Государственные эталоны разрабатывают, воспроизводят и хранят метрологические институты. Государственные эталоны возглавляют поверочные схемы.

Государственные эталоны, воспроизводящие единицу в различных диапазонах значений, образуют комплекс государственных эталонов.

Государственные эталоны представляют собой комплекс средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающих возможность воспроизведения единицы физической величины, ее хранение, а также передачу размера единицы вторичным эталонам с целью достижения единства измерений во всех областях науки и техники.

Вторичный эталон – эталон, значение которого устанавливается по первичному эталону.

По своему метрологическому назначению, т.е. по той роли, которую играют эталоны в деле сохранения единиц измерения, вторичные эталоны разделяются на: а) эталоны-копии, б) эталоны-свидетели, в) эталоны сравнения, г) рабочие эталоны.

Эталон-копия – вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам. Эталон-копия, являясь копией государственного эталона по метрологическому назначению, может не являться его физической копией. Так, например, в отличие от первичного эталона единицы силы света – кандеры, представляющей собой полный излучатель при температуре затвердевания платины, эталон-копия выполнен в виде группы электрических ламп накаливания.

Эталон-свидетель представляет собой вторичный эталон, предназначенный для проверки сохранности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. Эталон-свидетель применяется лишь тогда, когда государственный эталон

является невоспроизводимым. Так как большинство государственных эталонов в настоящее время воспроизводится, эталоны-свидетели применяются редко (эталон единицы массы – килограмм).

Эталон сравнения – вторичный эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом. Примером эталона сравнения служит нормальный элемент, используемый для сличений государственного эталона вольта России с эталоном вольта Международного бюро мер и весов. Эталоны сравнения могут применяться не только для международных сличений, но и для сличения эталонов данной страны, находящихся в разных местах и не могущих транспортироваться. Отсюда вытекает одно из основных требований, предъявляемых к эталону сравнения – приспособляемость к перевозкам при высокой неизменности размера хранимой им единицы.

Рабочий эталон – эталон, применяемый для передачи размера единицы образцовым средствам измерений высшей точности, и в отдельных случаях – наиболее точным рабочим средствам измерений. Применяемые для текущих метрологических работ рабочие эталоны подвергаются износу и вследствие этого нуждаются в сравнительно частых повторных сличениях с первичными эталонами или их копиями. Изготавливаются рабочие эталоны по возможности из не очень ценных материалов, им придается удобная в обращении конструкция.

В зависимости от способа и физических условий воспроизведения единицы, а также их свойств и конструкции, различают: а) одиночные эталоны; б) групповые эталоны; в) эталонные наборы; г) эталонные установки.

Одиночными эталонами называются эталоны, воспроизводящие единицу измерения, находясь в одном экземпляре, т.е. самостоятельно, без участия других подобных эталонов. Таким является, например, первичный эталон килограмма. Одиночные эталоны осуществляются в тех случаях, когда более или менее несомненной является их неизменность во времени.

Групповыми эталонами называются эталоны, состоящие из совокупности отдельных элементов, применяемой как одно целое для воспроизведения единицы измерения.

Различают групповые эталоны постоянного и переменного состава.

В групповых эталонах постоянного состава число отдельных входящих в них эталонов сохраняется постоянным и эти отдельные эталоны не заменяются новыми. Примером группового эталона постоянного состава служат первичный эталон ома, состоящий из шести одинаковых катушек электрического сопротивления.

В групповых эталонах переменного состава отдельные входящие в них эталоны могут частично или полностью заменяться по мере надобности (старение, износ) вновь изготавливаемыми эталонами. Примером группового эталона переменного состава служит первичный эталон вольта, состоящий из 20 насыщенных нормальных элементов, периодически заменяемых новыми.

Групповые эталоны осуществляются в тех случаях, когда изготовление отдельных эталонов связано с погрешностями, которые необходимо свести до минимума, или когда значения отдельных эталонов подвержены колебаниям, не поддающимся учету. Так как размер единицы, воспроизводимой групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое размеров, входящих в группу эталонов, погрешности и колебания отдельных эталонов в определенной степени компенсируют друг-друга. Это и обуславливает повышение точности воспроизведения единицы измерения средним арифметическим.

Эталонными наборами называются наборы эталонов, позволяющие воспроизводить некоторый диапазон значений, выражаемый различным числом единиц измерений. Каждый входящий в набор эталон воспроизводит или различные неодинаковые (обычно кратные или дольные) значения (в случае набора мер) или области значений (разные участки шкал) величины (в случае набора измерительных приборов). Примерами могут служить эталонные наборы гирь, ареометров, концевых мер. Следовательно, эталонные наборы осуществляются в тех случаях, когда необходимо охватить определенную область измерений. Эталонные наборы так же как и групповые эталоны могут быть как постоянного, так и переменного состава.

Эталонными установками называются измерительные установки, входящие в комплекс средств измерений, утвержденный в качестве эталона. В состав эталонных установок входят вещества или

тела, на постоянных свойствах которых основано определение единицы, меры, измерительные приборы и принадлежности, а также вспомогательные устройства (устройства питания, регулирования и стабилизации режима и др.). Примерами эталонных установок служат установки для воспроизведения единицы измерения длины – метра, световых единиц и др. Эталонные установки осуществляются в тех случаях, когда эталон не может быть конструктивно оформлен в виде единого целого вследствие своей громоздкости или разнородности входящих в него составных частей.

3.2. Образцовые средства измерений

Правильный размер единиц измерений от эталона до рабочих средств измерений передают образцовые средства измерений. Такой процесс передачи размера единиц представляет собой поверку средств измерений, под которой подразумевается определение метрологическим органом погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению. Отсюда следует, что все образцовые средства измерений являются средствами поверки.

Образцовое средство измерения – мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых. В отличие от образцовых средств измерений **рабочее средство измерений** – средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единицы. Именно в этом – в метрологическом назначении, а не в точности или конструктивных особенностях суть различия образцовых и рабочих средств измерений.

Из приведенных определений, например, совершенно не следует, что рабочие средства измерений являются вообще менее точными, чем образцовые (гири и весы, применяемые при лабораторных анализах, могут иметь более высокую точность, чем образцовые гири и весы, по которым поверяются обыкновенные торговые гири). Одно и то же средство измерений может быть предназначено для использования либо в качестве рабочего, либо образцового средства измерений. Однако средство, используемое в качестве образцового, должно применяться только для целей поверки, проведение им практических измерений не допускается.

Различная точность применяемых на практике рабочих средств измерений требует для их поверки наличия образцовых средств измерений различной точности. В зависимости от точности и способов поверки образцовые средства измерений делятся на разряды, нумеруемые следующим образом: 1-й, 2-й, 3-й и т.д.

Разряд образцовых средств измерений – категория образцовых средств измерений, отнесенных к одной и той же ступени поверочной схемы (см. следующий параграф).

Образцовые средства измерений 1-го разряда – средства измерения, поверяемые непосредственно по рабочим эталонам.

Образцовые средства измерений 2-го разряда – средства измерения, поверяемые по образцовым средствам измерений 1-го разряда.

Образцовые средства измерений 3-го разряда – средства измерения, поверяемые по образцовым средствам измерений 2-го разряда и т.д.

Следовательно, чем ниже разряд, тем меньше точность образцовых средств измерений; образцовые средства измерений 1-го разряда менее точны, чем эталоны.

Число разрядов образцовых средств измерений устанавливается исходя из требований практики различным для разных видов измерений и устанавливается стандартами на поверочные схемы для данного вида средств измерений.

Образцовые средства измерений отдельных органов метрологической службы подразделяются на исходные и подчиненные.

Исходным образцовым средством измерений называется образцовая мера или образцовый измерительный прибор, соответствующий высшей ступени поверочной схемы органа метрологической службы. **Подчиненным образцовым средством измерений** называется образцовая мера, образцовый измерительный прибор или образцовый измерительный преобразователь низшего разряда по сравнению с исходным образцовым средством измерений.

Исходные образцовые средства измерений подлежат поверке в вышестоящем органе метрологической службы, подчиненные же – непосредственно в органе, применяющем эти средства.

Образцовые средства измерений для выполнения поверки часто объединяются с различными вспомогательными приборами и оборудованием (компарирующие приборы, регулировочные уст-

ройства и т.д.) в измерительные установки, называемые поверочными. **Поверочная установка** – измерительная установка, укомплектованная образцовыми средствами измерений и предназначенная для поверки других средств измерений. Примерами поверочных установок служат установка для поверки термометров, состоящая из образцовых термометров, устройств для воспроизведения постоянных температурных точек, термостатов и т.д.; установка для поверки электрических счетчиков, включающая образцовые ваттметры, щит для навешивания и соединения счетчиков, вспомогательные приборы, а также питающие и регулирующие устройства.

В качестве образцовых средств измерений обычно выбираются средства измерений высших классов точности из числа изготавливаемых промышленностью, отличающиеся высокой стабильностью и воспроизводимостью показаний. Что же касается величины поправок к их показаниям, то они принципиального значения для аттестации средств не имеют, хотя и должны быть определены путем более тщательной предварительной поверки, чем для рабочих средств измерений той же точности.

Утверждение представленных средств измерений в качестве образцовых производится обычно органами Государственной метрологической службы (иногда по их разрешению органами отраслевых метрологических служб), располагающими образцовыми средствами измерения более высокого разряда, чем аттестуемые.

Все образцовые средства измерений, хранимые и применяемые органами Государственной и отраслевой метрологических служб, подлежат обязательной периодической поверке в сроки, устанавливаемые соответствующими правилами.

К образцовым средствам измерений относятся также образцовые вещества – некоторые химические элементы и соединения, отличающиеся вследствие специальной особо тщательной очистки от примесей высоким постоянством и воспроизводимостью свойств. Согласно определению **образцовое вещество** – это образцовая мера в виде вещества с известными свойствами, воспроизводимыми при соблюдении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации.

Образцовыми веществами являются, например, чистая вода, чистые газы (водород, кислород), чистые металлы (цинк, серебро, золото, платина), неметаллы и соединения (сера, бензойная кис-

лота) и др. Подвергшаяся многократной перегонке, чистая вода имеет известные с высокой степенью точности плотность, вязкость, температуру затвердевания, температуру кипения и т.д., т.е. она может быть использована как мера плотности, вязкости и т.д. Бензойная кислота, имеющая известную теплоту сгорания, используется для градуировки калориметров, а чистые металлы – для воспроизведения постоянных точек температурной шкалы.

Методы воспроизведения единиц измерения по свойствам образцового вещества, которое не входит конструктивно в состав мер и измерительных приборов, называются эталонными методами. Таковыми являются, например, калориметрический метод воспроизведения единицы количества тепла (калории), метод температурных репер для установления температурной шкалы и т.д. Эталонные методы служат для передачи значений воспроизводимых единиц вторичным эталонам, а также непосредственно образцовым средствам измерений 1-го разряда.

К образцовым веществам примыкают образцы некоторых веществ и материалов, применяемые как средства передачи единиц от образцовых средств измерения поверочным в тех случаях, когда их непосредственное сличение невозможно. Оценку погрешностей поверяемого средства измерений осуществляют путем определения интересующего свойства образца поочередно образцовым и поверяемым средствами и сопоставления полученных результатов. Такие образцы – носители характеристик свойств и состава, известны как стандартные образцы.

Стандартный образец – мера для воспроизведения единиц величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов. Стандартные образцы могут хранить и передавать не одну какую-либо единицу, а целый комплекс свойств вещества или материала. В качестве примеров можно привести стандартный образец свойств ферромагнитных материалов – пробу из этих материалов, которой приданы размеры, удобные для определения их магнитных свойств (кривых намагничивания, потерь на перемагничивание и др.); стандартный образец среднелегированной стали с аттестованным содержанием химических элементов, стандартные образцы диэлектриков для аттестации измерителей диэлектрической постоянной и угла потерь диэлектриков на высоких частотах и т.д.

Придавая большое значение разработке, аттестации и выпуску стандартных образцов, организован выпуск обширной номенклатуры образцовых веществ и стандартных образцов. В их числе фотометрические и спектрофотометрические эталоны, образцы отражательной, лучеиспускательной и излучательной способности, прозрачности, блеска, мутности, образцовые источники цветовой температуры, образцовые газовые смеси, образцовые растворы, спектрографические образцы, эталоны ионизирующих излучений и др. Значительная номенклатура стандартных образцов, охватывающая твердые, жидкие и газообразные вещества, служащие средством воспроизведения разнообразных свойств и единиц измерений, заставляет отнести службу стандартных образцов к одному из важнейших звеньев метрологической службы.

3.3. Понятие о поверочных схемах

Для обеспечения правильной передачи размера единиц измерения от эталонов образцовым средствам измерений, а от них – рабочим средствам измерений, должен быть установлен определенный порядок. Этот порядок приводится в поверочных схемах.

Поверочная схема – утвержденный в установленном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единицы от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений. В поверочной схеме, как правило, должна быть представлена передача размера единицы только одной физической величины.

Различают поверочные схемы общегосударственные и локальные (отдельных органов государственной метрологической службы или ведомственных метрологических служб).

Поверочные схемы, утверждаемые в качестве государственных стандартов, служат основанием для составления локальных поверочных схем и для разработки государственных стандартов и методических указаний на методы и средства поверки образцовых и рабочих средств измерений.

Локальные поверочные схемы утверждаются руководителями предприятий или организаций, в которых используется данная поверочная схема, по согласованию с органами государственной метрологической службы, осуществляющими для них поверку ис-

ходных образцовых средств измерений, включенных в поверочную схему. В локальную поверочную схему включаются все находящиеся в эксплуатации или выпускаемые в обращение рабочие средства измерений данной физической величины.

Структурными элементами поверочной схемы, утверждаемой в качестве государственных стандартов, являются наименования государственных эталонов, эталонов-копий, эталонов-свидетелей, эталонов сравнения, рабочих эталонов, образцовых средств измерений и рабочих средств измерений, а также методов передачи размера единиц (методов поверки).

Структурными элементами локальной поверочной схемы являются наименования образцовых средств измерений, рабочих средств измерений, а также методов поверки. Правда, допускается включение в поверочную схему также и наименований эталонов-копий и рабочих эталонов.

Поверочные схемы состоят из текстовой части (вводная часть и пояснения к элементам поверочной схемы) и чертежа, на котором должны быть указаны наименования средств измерений; диапазоны значений физических величин; обозначения и оценки погрешностей; наименования методов поверки.

Чертеж поверочной схемы состоит из нескольких разделенных штриховыми линиями горизонтальных полей, соответствующих отдельным ступеням передачи размеров единицы от государственного эталона или от исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений. Наименование этих полей (эталон, образцовые средства измерений 1-го разряда, образцовые средства измерений 2-го разряда и т.д., рабочие средства измерений) указываются в левой части чертежа и отделяются от полей вертикальной прямой линией (см. рис. 1). В полях размещают структурные элементы поверочной схемы, заключаемые в прямоугольники, круги или овалы (прямоугольники для эталонов, круги или овалы – в зависимости от количества слов в наименовании – для методов поверки). Соподчиненность элементов указывают соединительными линиями.

В верхнем поле чертежа поверочной схемы, возглавляемой государственным эталоном, указывают наименования эталонов в порядке их соподчиненности. Наименование государственного эталона заключают в прямоугольник, обведенный двойной линией.

Для средств измерений производных величин, единицы которых воспроизводятся косвенным путем без эталонов (например, объема и вместимости), в верхнем поле указывают наименование образцовых средств измерений, применяемых для воспроизведения данной

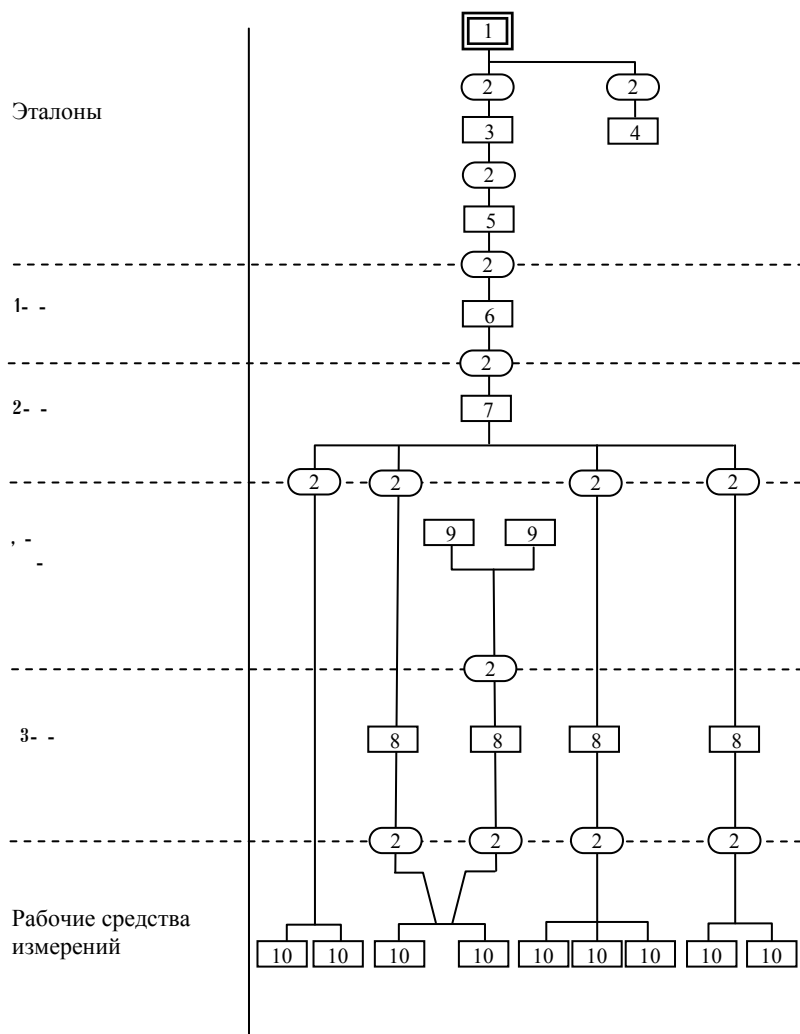


Рис. 1. Пример компоновки элементов поверочной схемы: 1 – государственный эталон; 2 – метод передачи размера единиц; 3 – эталон-копия; 4 – эталон-свидетель; 5 – рабочий эталон; 6, 7 и 8 – образцовые средства измерений соответствующих разрядов; 9 – образцовые средства измерений, заимствованные из других поверочных схем; 10 – рабочие средства измерений

единицы, заимствованных из поверочных схем соответствующих видов средств измерений (наименование образцовых средств измерений при этом сопровождаются ссылками на поверочные схемы, из которых они заимствованы).

Под полем эталонов располагают поле образцовых средств измерений 1-го разряда и далее, при наличии последующих разрядов, – поля этих разрядов. В этих полях помещаются наименования образцовых средств измерений соответствующего разряда с указанием диапазонов измерений и погрешности (при наличии общепринятых классов точности вместо погрешности указывают класс точности). В поверочных схемах, в которых показана передача размера единицы от образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем, наименования этих образцовых средств измерений помещаются в специально отведенном для них поле (рис. 1).

Под полем образцовых средств измерений низшего разряда помещают поле рабочих средств измерений. Рабочие средства измерений подразделяют по точности, а также по видам и диапазонам измерений на группы, располагая наименования групп слева направо в порядке убывающей точности. Данные о точности и диапазонах измерений приводятся вместе с наименованием рабочих средств измерений.

Круги или овалы с указанием методов поверки помещают в разрыв линий, соединяющих наименования объектов поверки и средств измерений, от которых передается размер единицы. Круги или овалы, находящиеся ниже поля эталонов, располагают в разрывах штриховых линий, разделяющих соответствующие поля схемы.

Методы поверки, указываемые на поверочной схеме, должны соответствовать одному из следующих общих методов:

- 1) непосредственное сличение поверочного средства измерений с образцовым средством того же вида (т.е. меры с мерой или измерительного прибора с измерительным прибором);

2) сличение поверяемого средства измерений с образцовым средством измерений того же вида при помощи компаратора;

3) прямое измерение поверяемым измерительным прибором величины, воспроизведенной образцовой мерой;

4) прямое измерение образцовым измерительным прибором величины, воспроизведенной образцовой мерой;

5) косвенные измерения величины, воспроизводимой мерой или измеряемой прибором, подвергаемыми поверке;

6) независимая поверка, т.е. поверка средств измерений относительных (безразмерных) величин, не требующая передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений, градуированных в единицах размерных величин.

Устанавливая соподчинение эталонов и образцовых средств измерений, поверочные схемы позволяют определить, какого разряда образцовыми средствами измерений надо пользоваться при поверке средств измерений различного класса точности.

Поверочные схемы разрабатываются метрологическими институтами страны.

Контрольные вопросы

1. Что такое эталон единицы физической величины?
2. Какие типы эталонов вам известны?
3. На какие группы подразделяются по метрологическому назначению вторичные эталоны? Дайте определения этих эталонов.
4. На какие группы подразделяются эталоны в зависимости от способа и физических условий воспроизведения единицы, а также их свойств и конструкции?
5. Дайте определение образцового и рабочего средства измерения.
6. Что вы знаете о разряде образцовых средств измерения?
7. Сформулируйте отличие исходных и подчиненных образцовых средств измерения.
8. Дайте определение образцового вещества. Приведите примеры образцовых веществ.
9. Что из себя представляет стандартный образец?
10. Что такое поверочная схема и для чего она предназначена? Какие существуют виды поверочных схем?
11. Перечислите структурные элементы поверочных схем.
12. Из чего состоят поверочные схемы?
13. Что указывается в полях чертежа поверочной схемы?
14. Приведите пример компоновки элементов поверочной схемы.

4. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Виды измерений

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерения весьма разнообразны и классифицировать их можно по различным признакам.

По способу получения числового значения измеряемой величины измерения разделяют на четыре вида: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. При прямых измерениях искомое значение определяется с помощью средств измерения, находящихся под воздействием этой величины, путем ее непосредственного сравнения с мерами, или с помощью измерительных устройств, градуированных в единицах измеряемой величины. Следовательно, характерным признаком прямых измерений является применение средств измерений, предназначенных именно для данной величины.

Примерами прямых измерений являются измерения длины с помощью линейных мер, массы на циферблатных или равноплечных весах, времени посредством часов, силы тока амперметром, температуры термометром, электрической энергии при помощи электрического счетчика и т.д.

Прямые измерения условно можно выразить формулой

$$Q = X,$$

где Q – искомое значение измеряемой величины, а X – значение, непосредственно получаемое из опытных данных.

Косвенными называют измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

$$\begin{aligned} [(1^{**}) + (1^*)] - (2) &= X_8 \\ [(1^{**}) + (1)] - (2) &= X_9 \\ [(1^*) + (1)] - (2) &= X_{10} \end{aligned}$$

Здесь поставленные в круглые скобки числа означают отдельные гири, действительные значения которых отыскиваются; X_1 – найденное прямым измерением действительное значение массы 100-граммовой гири, $X_2, X_3, \dots, X_{10}$ – определенные прямыми измерениями разности между сличаемыми номинально равными по массе комбинациями гирь. Как видим, входящие в эту систему уравнения различны по форме.

Совместными называют производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднोименных величин для нахождения зависимости между ними.

Здесь так же как и в случае совокупных измерений значения искомых величин $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ находят по системе уравнений, связывающих их с некоторыми другими величинами $X_1, X_2, \dots, X_k$, измеряемыми прямыми или косвенными методами. Однако сама система вследствие того, что от опыта к опыту изменяются условия измерения (а не сочетания искомых величин, как это было при совокупных измерениях) будет содержать уравнения одинакового вида, причем от уравнения к уравнению будут меняться значения величин $X_1, X_2, \dots, X_k$.

$$\begin{aligned} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_m; X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_k^{(1)}) &= 0, \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_m; X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, \dots, X_k^{(2)}) &= 0, \\ &\vdots \\ f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_m; X_1^{(n)}, X_2^{(n)}, \dots, X_k^{(n)}) &= 0. \end{aligned} \quad (4.3)$$

В системе (4.3) $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_k^{(i)}$ – полученные в i -том опыте ($i = 1, 2, \dots, n$) значения величин, измеряемых прямыми или косвенными методами. Осуществив подстановку в систему уравнений (4.3) результатов прямых или косвенных измерений и проведя преобразования, получим условные уравнения (4.2), по которым методом наименьших квадратов оцениваются значения $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$.

Для пояснения сказанного приведем пример совместных измерений, заключающийся в определении коэффициентов в температурной формуле для сопротивления измерительного резистора

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2.$$

Здесь R_t – сопротивление резистора при температуре t – соответствует X_1 , а $t - X_2$ системы (4.3), т.е. относятся к величинам, измеряемым прямыми способами; R_{20} – электрическое сопротивление при нормальной температуре 20^0 С, α и β – температурные коэффициенты являются искомыми величинами, соответствующими Q_1, Q_2 и Q_3 .

Меняя при измерении тепловой режим измерительного сопротивления и измеряя сопротивление R_t при ряде температур $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(n)}$, получим систему одинаковых по форме уравнений

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

$$R_t^{(2)} = R_{20} + \alpha(t^{(2)} - 20) + \beta(t^{(2)} - 20)^2,$$

.....

$$R_t^{(n)} = R_{20} + \alpha(t^{(n)} - 20) + \beta(t^{(n)} - 20)^2.$$

которую с учетом числовых значений $R_t^{(i)}$ и $t^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) можно привести к форме условных уравнений

$$R_{20} - R_t^{(1)} + \alpha(t^{(1)} - 20) + \beta(t^{(1)} - 20)^2 = 0,$$

$$R_{20} - R_t^{(2)} + \alpha(t^{(2)} - 20) + \beta(t^{(2)} - 20)^2 = 0,$$

.....

$$R_{20} - R_t^{(n)} + \alpha(t^{(n)} - 20) + \beta(t^{(n)} - 20)^2 = 0.$$

Решение этой системы относительно α, β и R_{20} даст искомые значения коэффициентов в температурной формуле для сопротивления резистора.

По условиям, определяющим точность результата, измерения делятся на три класса.

1. Измерения максимально возможной точности, достижимой при существующем уровне техники. К ним относятся в первую очередь эталонные измерения, связанные с максимально возмож-

ной точностью воспроизведения установленных единиц физических величин, и, кроме того, измерения физических констант, а также некоторые специальные измерения, требующие высокой точности.

2. Контрольно-поверочные измерения, погрешность которых не должна превышать некоторое заданное значение. К ним относятся измерения, выполняемые лабораториями государственного надзора за внедрением и соблюдением стандартов и состоянием измерительной техники и заводскими измерительными лабораториями, осуществляемые такими средствами измерений и по такой методике, которые гарантируют погрешность результата, не превышающую некоторого, заранее заданного значения.

3. Технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений. По способу выражения результатов измерений различают абсолютные и относительные измерения.

Абсолютными называются измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин (или) использовании значений физических констант. Примером абсолютных измерений может служить определение силы электрического тока в амперах, скорости в метрах в секунду.

Относительными называются измерения отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Примером относительных измерений являются измерение относительной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в 1 м^3 воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает 1 м^3 воздуха при данной температуре.

Основными характеристиками измерений являются: принцип измерений, метод измерений, погрешность, точность, правильность и достоверность измерений.

Принцип измерений – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, измерения температуры с использованием термоэлектрического эффекта; измерения массы взвешиванием (использование силы тяжести, пропорциональной массе); измерения расхода газа или жидкости по перепаду давления в суживающем устройстве.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Средствами измерений являются используемые технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Правильность измерений – качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

Достоверность измерений характеризует доверие к результатам измерений и делит их на две категории: достоверные и недостоверные.

Более подробно основные характеристики измерений будут рассмотрены в последующих параграфах учебного пособия.

4.2. Методы измерений

Метод измерения – это совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Здесь под *принципом измерения* подразумевается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, а под *средствами измерения* – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства.

В параграфе 4.1 при классификации измерений по способу получения числового значения измеряемой величины мы видели, что рассмотренные виды измерений в конечном счете могут быть сведены к прямым. Поэтому мы сочли возможным ограничиться в основном ознакомлением именно с методами прямых измерений.

Одна и та же физическая величина в зависимости от требуемой точности, удобства, быстроты и условий измерения, устройства и действия средств измерений, приемов их использования и т.д. может быть измерена несколькими методами, отличающимися особенностями как технического, так и методического характера. Если в отношении технических особенностей существует и разрабатывается множество методов, рассматриваемых обычно в отраслевых курсах измерений (электрических, магнитных, неэлектрических и т.д.), то с методической стороны все методы измерений поддаются систематизации по общим характерным признакам.

По признаку способа сравнения с мерой (с единицей) целесообразно все методы разделить на два класса: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой (метод сравнения).

Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Таковыми являются, например, измерения давления пружинным манометром, массы на циферблатных весах, силы электрического тока амперметром и т.д. В этих измерениях меры в явном виде не участвуют и измерительный прибор подвергается воздействию всей измеряемой величины – в этом заключается характерный признак метода непосредственной оценки. Метод непосредственной оценки, дающий значение измеряемой величины непосредственно без каких-либо дополнительных действий со стороны оператора, и без вычислений (кроме умножения его показаний на постоянную измерительного прибора или цену деления) отличается большой быстротой. Однако точность этого метода измерения обычно ограничена и имеет пределом точность применяемых измерительных приборов. В связи с простотой выполнения измерений метод непосредственной оценки получил широкое практическое применение.

Метод сравнения с мерой (метод сравнения) – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Таковыми являются, например, измерения массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями; измерения напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с ЭДС нормального элемента и т.д. Значение измеряемой величины либо принимают равным значению меры, либо вычисляют как сумму значения участвующей в сравнении меры и показания измерительного прибора. Методы сравнения с мерой дают возможность получить более высокую точность результата измерения, чем метод непосредственной оценки. Разновидностями метода сравнения по признаку способа проведения эксперимента являются дифференциальный, нулевой методы, а также методы совпадения, противопоставления и замещения.

Дифференциальным называется метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой. В качестве примера можно привести измерения, выполняемые при

поверке мер длины сравнением с образцовой мерой на компараторе, сравнение ЭДС двух нормальных элементов и др. Вообще дифференциальный метод применим во всех тех случаях, когда просто и точно реализуется операция вычитания величин (длины, перемещения, электрические напряжения и ЭДС). Исходя из этого, этот метод не применим при измерении таких величин, как температура, твердость.

Дифференциальный метод дает весьма точные результаты, когда сравниваемые искомая и известная, воспроизведенная мерой величины близки друг к другу. При этом ввиду измерения компарирующим прибором небольшой разности погрешность измерений будет зависеть в основном от точности меры, погрешность же прибора войдет лишь своей небольшой долей. Так, например, если разность составляет 0,001 от измеряемой величины и измеряется прибором с погрешностью до 1 %, то погрешность измерения искомой величины составит 0,001% (погрешность, вносимая компарирующим прибором, составит не более 1% от 0,001, т.е. не более 10^{-5} измеряемой величины). Осуществление дифференциального метода измерений, позволяющего получить результаты с высокой точностью даже при применении относительно грубых средств для измерения разности, возможно только при условии воспроизведения с большой точностью величины, значение которой близко к значению искомой измеряемой величины.

Дифференциальный метод нашел широкое применение во многих областях измерений.

Нулевым называется метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля. Таковыми являются, например, измерения электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием, измерения массы при помощи гирь на рычажных (как равноплечих, так и неравноплечих) весах и др. В нулевом методе для приведения к нулю разности между искомой и воспроизводимой мерой величинами (результирующего эффекта воздействия) необходимо иметь средства измерений, позволяющие воспроизводить любые значения известной величины без существенного понижения точности. Такими средствами измерения обычно являются меры переменного значения или наборы (магазины) мер (например, наборы гирь), из которых составляются различные вос-

производящие измеряемую величину сочетания. Подбором размера воспроизводимой мерой величины или путем ее принудительного изменения эффект воздействия сравниваемых величин на прибор сравнения доводят до нуля. Совпадение значений этих величин (уравновешивание) отмечается при помощи нуль-индикатора (например, стрелка рычажных весов устанавливается на нуле). Ввиду совпадения (равенства нулю разности) значение измеряемой величины принимается равным значению меры.

Пример. Измерение массы на равноплечих весах, когда воздействие на весы массы m_x полностью уравновешивается массой гирь m_0 (рис.2,а).

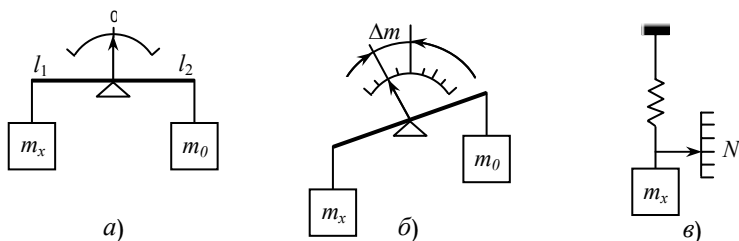


Рис.2. Методы сравнения

Отсюда видно, что точность нулевого метода определяется точностью, с которой известно значение меры, и чувствительностью нулевых приборов. А так как нулевые приборы, применяемые для этого метода (весы, гальванометры и т.д.), обычно обладают высокой чувствительностью, точность нулевого метода оказывается также достаточно высокой.

Нулевой метод превращается в дифференциальный, если равновесие не доводится до конца и измеряется получающаяся между сравниваемыми величинами разность.

Пример. Измерение массы на равноплечих весах, когда воздействие массы m_x на весы частично уравновешивается массой гирь m_0 , а разность масс отсчитывается по шкале весов, градуированной в единицах массы (рис.2,б). В этом случае значение измеряемой величины $m_x = m_0 + \Delta m$, где Δm — показание весов.

Этим приемом пользуются при самых точных измерениях. Иногда его называют методом ложного нуля, а по отношению к мосту – методом неуравновешенного моста.

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

Пример. Измерение длины с помощью штангенциркуля с нониусом основано на использовании метода совпадений: наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса.

Принцип совпадения сигналов лежит также в основе методов измерений, в которых используются явления биений и интерференции, а также стробоскопический эффект.

Пример. При измерении частоты вращения стробоскопом наблюдают совпадения положения какой-либо марки на вращающемся объекте в моменты всплеск известной частоты.

Так как степень несовпадения отметок или сигналов существующими приемами может быть оценена с большой точностью, метод совпадения также относится к точным методам. Метод совпадения, так же как и нулевой метод, является разновидностью метода противопоставления.

Методом противопоставления называется 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 можно привести измерения массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравновешивающих ее гирь на двух чашках весов и определением измеряемой массы как суммы массы гирь, ее уравновешивающих, и показания по шкале весов.

Следует отметить, что в отличие от дифференциального метода, где на измерительный прибор (необязательно прибор сравнения) воздействует разность измеряемой величины и величины, воспроизведенной мерой, в методе противопоставления на прибор сравнения воздействуют одновременно обе эти величины. Измеряемая величина противопоставляется мере и их соотношение устанавливается по разности эффектов их действия на прибор сравне-

ния (равноплечие весы, электроизмерительный потенциометр, компаратор для мер длины и т.п.). Если в методе противопоставления разность эффектов измеряемой величины и мер приводится к нулю, т.е. производится их полное уравнивание, получим рассмотренный выше нулевой метод.

Метод противопоставления позволяет уменьшить воздействие на результаты измерений влияющих величин, поскольку они одинаково искажают сигналы измерительной информации как со стороны измеряемой, так и воспроизводимой мерой величин и в определенной степени компенсируют друг друга. В этом можно легко убедиться на примере измерения массы на равноплечих весах в условиях разных широт и высот от уровня моря (т.е. при различных величинах силы тяжести) – результат измерения будет практически оставаться одним и тем же.

Методом замещения называется метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Таковым является, например, взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

Сущность метода замещения заключается в том, что измеряемая величина в процессе измерения заменяется в измерительной установке некоторой известной, воспроизводимой мерой величины. Путем изменения воспроизводимой мерой величины измерительная установка может быть приведена в прежнее или близкое к прежнему состояние. Соответственно говорят, что имеет место полное и неполное замещение и различают метод полного и неполного замещения. При полном замещении достигаются те же показания приборов, что и при действии измеряемой величины; результат измерения в данном случае принимается равным значению меры. При неполном замещении показания могут отличаться от получаемых при действии измеряемой величины; для получения в данном случае значения измеряемой величины к значению меры следует прибавить величину, на которую изменилось показание прибора.

Для пояснения этого метода рассмотрим два примера. В первом из них, касающемся вышеназванного метода Борда, на одну чашку весов кладется измеряемая масса, а на другую какая-либо

тара, уравнивающая массу; затем взвешиваемая масса снимается и вместо нее кладутся гири, пока не установятся прежние условия равновесия. Результат измерения в данном случае принимается равным массе гирь. В качестве другого примера можно привести измерение электрического сопротивления, когда в схему вместо измеряемого сопротивления включают известное сопротивление в виде магазина и при прочих равных условиях добиваются прежнего отклонения показывающего измерительного прибора (гальванометра или вольтметра).

Пример. Взвешивание на пружинных весах. Измерение производят в два приема. Вначале на чашу весов помещают взвешиваемую массу и отмечают положение указателя весов; затем массу m_x замещают массой гирь m_0 , подбирая ее так, чтобы указатель весов установился точно в том же положении, что и в первом случае. При этом ясно, что $m_x = m_0$ (рис.2,з).

Метод замещения является весьма точным методом, так как при замене измеряемой величины известной никаких изменений в состоянии и действии измерительной установки не происходит, вследствие чего неточность в показаниях измерительных приборов, обусловленная их внутренними свойствами и воздействием различных внешних факторов (помех), не оказывает влияния на результат измерения.

Резюмируя вышесказанное о двух основных классах методов прямых измерений, можно констатировать, что методы сравнения с мерой более точны, чем метод непосредственной оценки. Однако методами сравнения с мерой можно измерять лишь величины, воспроизводимые с помощью мер. Таковыми являются величины, являющиеся свойствами или параметрами физических систем (длина, масса, объем жидкости, частота колебаний, ЭДС, электрические сопротивление, емкость, индуктивность и др.). Величины, являющиеся характеристиками физических процессов (скорость, работа, мощность, давление, сила электрического тока и др.) не воспроизводятся с помощью мер, а поэтому прямым способом могут быть измерены лишь методом непосредственной оценки. При необходимости повысить точность измерения приходится прибегать к косвенным измерениям.

Если для прямых измерений могут быть успешно применены методы непосредственной оценки и методы сравнения с мерой, то

при косвенных измерениях широко применяется преобразование измеряемой величины в процессе измерений. Практика показывает, что в подавляющем большинстве случаев измерения связаны с преобразованием измеряемой величины. Измерения методами преобразования основаны на преобразовании измеряемых величин в электрические, магнитные и др. Так, например, нагревание места спая двух электродов из разнородных материалов (спая термопары) вызывает появление ЭДС, что позволяет измерять температуру; нагревание электрических проводников и полупроводников вызывает изменение их сопротивления (термометры сопротивления, термисторы), что также позволяет измерять температуру; растяжение или сжатие некоторых металлов в пределах их упругости вызывает изменение их электрического сопротивления, что дает возможность изготавливать электротензометры и измерять малые деформации тел; сдавливание или растягивание некоторых кристаллов вызывает появление на их гранях ЭДС (пьезоэлектрический эффект), что может быть использовано для измерения давления, вибрации, частоты электрических колебаний; освещение пограничного слоя между некоторыми полупроводниками и металлами вызывает возникновение в нем ЭДС (фотоэлектрический эффект), что используется для изготовления фотоэлементов и измерения световых величин; освещение некоторых полупроводников изменяет их электрическое сопротивление, что используется для изготовления фотосопротивлений и измерения световых величин; зависимость яркости свечения тела от температуры, которая в свою очередь зависит от силы тока, накаливающего нити, позволяет измерить температуру бесконтактным методом при помощи оптического пирометра; механические силы (растягивающие, сжимающие, изгибающие, скручивающие) изменяют магнитную проницаемость тел из ферромагнитных материалов, что может быть измерено и дает представление об этих силах (магнитострикционные преобразователи); зависимость электрической емкости плоского конденсатора от расстояния между обкладками используют для измерения малых размеров и малых перемещений; изменение воздушного зазора в сердечнике индуктивной катушки также может быть использовано для измерения перемещения и др.

Приведенными здесь методами, естественно, не исчерпывается многообразие приемов, применяемых в различных областях изме-

рений. Каждая область может иметь свои особые приемы, иногда совмещающие элементы прямых и косвенных измерений. Кроме того, рассмотренные нами приемы на практике обычно обрастают специальными приемами для исключения систематических погрешностей или уменьшения их влияния на результаты. Вследствие этого понятие о методе измерения расширяется, с ним связывается представление о совокупности всех приемов, при помощи которых выполняется измерение в каждом частном случае.

Для полноты укажем еще, что метод измерения, понимаемый как совокупность указаний о приемах и условиях выполнения измерений (спецификация, подлежащая выполнению при измерениях), не включает само выполнение измерений, сам процесс измерений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерения.
2. На какие виды разделяют измерения по способу получения числового значения измеряемой величины?
3. Дайте определения прямых, косвенных, совокупных и совместных измерений. Приведите примеры измерений каждого вида.
4. На какие классы делятся измерения по условиям, определяющим точность?
5. Какие измерения различают по способу выражения результатов измерения?
6. Перечислите основные характеристики измерений и дайте их определения.
7. Дайте определение метода измерения.
8. На какие классы целесообразно разделить все методы измерения по признаку сравнения с мерой?
9. В чем заключается суть метода непосредственной оценки?
10. Дайте определение метода сравнения с мерой (метода сравнения).
11. Перечислите разновидности метода сравнения по признаку способа проведения эксперимента.
12. В чем заключается дифференциальный метод сравнения с мерой?
13. Дайте определение нулевого метода сравнения с мерой.
14. Что такое метод совпадения?
15. Дайте определение метода противопоставления и отметьте его преимущества.
16. Что из себя представляет метод замещения?
17. Сопоставьте при прямых измерениях методы непосредственной оценки и методы сравнения с мерой.
18. Что применяется при косвенных измерениях?

5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения, как уже было отмечено выше, являются процессом, завершающим этапом которого является «результат измерения». **Результат измерения** – это значение величины, найденное путем ее измерения. Результат измерения является эмпирическим проявлением **истинного значения физической величины** – значения физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Результат измерения при любом измерении вследствие несовершенства методов и средств измерения, субъективных ошибок оператора (наблюдателя), непостоянства условий наблюдения и т.д. отличается от истинного значения величины. Поэтому при любом измерении, кроме результата измерения, необходимо определять и **точность измерения**, т.е. качество измерения, отражающее близость результата измерения к истинному значению величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям и, наоборот, большая погрешность – низкой точности измерения (количественно точность измерений может быть выражена обратной величиной модуля относительной погрешности. Так, например, если погрешность измерений равна $10^{-2}\% = 10^{-4}$, то точность равна 10^4).

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешности измерения бывают абсолютными и относительными.

Абсолютной погрешностью измерения называется погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Абсолютная погрешность измерения ΔX определяется формулой

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - Q,$$

где $X_{\text{изм}}$ – значение, полученное при измерении, а Q – истинное значение измеряемой величины.

Относительной погрешностью измерения называется отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{Q}.$$

Относительная погрешность может быть выражена в процентах

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{Q} \cdot 100\%.$$

Так как истинное значение измеряемой величины нам обычно неизвестно, о наличии погрешностей измерения приходится судить по результатам повторных измерений одной и той же величины, проведенных одними и теми же или разными приборами, методами, наблюдателями. Дело в том, что при проведении повторных измерений даже с наибольшей тщательностью мы каждый раз получаем несколько различные результаты. Причина этих различий кроется в том, что каждый из результатов содержит погрешность, значение которой от опыта к опыту может изменяться.

Стремясь повысить точность результата измерения, стремятся по возможности уменьшить его погрешности и тем самым как можно ближе подойти к истинному значению измеряемой величины.

Методы оценки степени приближения результата измерения к истинному значению измеряемой величины дала теория вероятностей. Она научила нас оценивать вероятные границы погрешностей, за пределы которых они не выходят. Оценка эта дается не с безусловной, 100%-ной достоверностью, а с несколько меньшей. Достоверность измерений характеризует степень доверия к результатам измерений. Достоверность оценки погрешностей определяют, используя законы теории вероятностей и приемы математической статистики.

Погрешности измерений в отношении характера и причин их появления делят на систематические погрешности, случайные погрешности, промахи и грубые ошибки. Погрешности двух последних видов как правило отбрасываются и при обработке результатов измерений не учитываются. В этом случае погрешность измерения можно представить в виде суммы

$$\Delta X = \delta + \theta,$$

где δ – случайная, а θ – систематическая погрешности.

5.1. Систематические погрешности

Систематическая погрешность измерения – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Примерами систематических погрешностей являются погрешность от несоответствия действительного значения меры, с помощью которой выполняют измерения, ее номинальному значению; погрешность вследствие постепенного уменьшения силы рабочего тока в цепи электроизмерительного потенциометра, погрешность метода измерения и т.д.

Систематические погрешности принято классифицировать в зависимости от причин их возникновения и по характеру их проявления при измерениях.

В зависимости от причин возникновения различают следующие группы: инструментальные погрешности; погрешности метода или теоретические погрешности; погрешности в результате неправильной установки измерительного устройства; погрешности, возникающие вследствие внешних влияний; субъективные (личные) погрешности.

а) Инструментальные погрешности

Инструментальной погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешностей применяемых средств измерений. Так, например, измерительным трансформаторам присущи погрешности коэффициента трансформации и так называемые угловые погрешности, причинами которых являются потери энергии в материале сердечника трансформатора; в равноплечных весах для точного взвешивания всегда обнаруживается некоторое неравенство плеч, которое полностью устранить путем регулировки не удастся.

Среди инструментальных погрешностей выделяются инструментальные погрешности, присущие данной конструкции (наличие «люфта», трения в сочленениях подвижных деталей приборов, эксцентricности вращающихся деталей приборов и т.д.); инструментальные погрешности, являющиеся следствием несовершенства или неправильности технологии изготовления средств измерения

(погрешности градуировки, возникающие в результате неточности нанесения отметок шкалы), инструментальные погрешности, являющиеся следствием износа, старения или неисправности средств измерения (износ гирь, концевых мер длины; старение – изменение с течением времени сопротивления материала, например, манганина; деформация и коррозия деталей измерительного механизма).

Инструментальные погрешности детально исследуются в специальном курсе – теории точности измерительных устройств.

б) Погрешности метода или теоретические погрешности

Погрешностью метода измерения называется составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерений. Так, например, сила, с которой гиря давит на чашку весов, меньше ее истинного веса на вес вытесненного ею объема воздуха (по закону Архимеда).

Среди погрешностей метода измерения выделяются погрешности, возникающие вследствие влияния измерительной аппаратуры на измеряемые свойства объекта (измерение температур жидкостными или газовыми термометрами; регистрация быстропротекающих процессов при недостаточном быстродействии аппаратуры и т.д.); погрешности, возникающие вследствие недостаточной разработки принятой теории метода измерений в целом или допущенных упрощений (погрешности метода измерения электрического сопротивления при помощи амперметра и вольтметра); погрешности, возникающие при экстраполяции свойства, измеренного на ограниченной области некоторого объекта на весь объект, если последний не обладает однородностью (определение объема цилиндрического тела или резервуара, ограничиваясь измерением диаметра и высоты только в одном месте и т.д.) и др.

в) Погрешности в результате неправильной установки измерительного устройства (погрешности установки)

Погрешностями установки называются погрешности, возникающие в результате неправильной или небрежной установки или расположения измерительной аппаратуры и других приспособлений, служащих для измерения. Такого рода погрешности могут быть вызваны, например, установкой средств измерений не по от-

весу или уровню; изменением положения подвижных частей средств измерения по отношению к неподвижным (взаимное расположение призмы и коромысла равноплечих весов; отклонение подвижной части гальванометра от исходного положения и др.); расположением устройств так, что они могут оказывать влияние (магнитное и другого типа) друг на друга; параллаксом при отсчете по шкале и т.д. Погрешностью от параллакса называется составляющая погрешности отсчитывания, происходящая вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от поверхности шкалы, в направлении, перпендикулярном поверхности шкалы. А под погрешностью отсчитывания понимается составляющая погрешности измерения, происходящая от недостаточно точного отсчитывания показаний средства измерений.

з) Погрешности, возникающие вследствие внешних влияний

Эти погрешности являются следствием неучтенных внешних влияний – влияния окружающей температуры, влияния магнитных и электрических полей, влияния атмосферного давления и влажности воздуха, влияния гравитационных, радиационных и других полей. Сюда можно отнести погрешности, обусловленные несогласованностью входных и выходных параметров электрических цепей приборов, а также неправильными манипуляциями операторов.

д) Субъективные систематические погрешности (личные погрешности)

Субъективными (личными) погрешностями измерения называются погрешности, обусловленные индивидуальными особенностями наблюдателя (особенностями его организма или укоренившимися навыками). Такого рода погрешности вызываются, например, запаздыванием или опережением при регистрации момента сигнала (при отсчете числа оборотов диска счетчиков); асимметрией, обнаруживающейся при установке штриха посередине между двумя нитями трубы или микроскопа или при отсчете долей деления шкалы, указываемых стрелкой и т.д. Личные погрешности существенно изменяются в зависимости от состояния наблюдателя (болезнь, возбуждение, усталость).

По характеру своего поведения в процессе измерения систематические погрешности разделяются на два класса – постоянные и переменные.

Постоянными систематическими погрешностями называются погрешности, сохраняющие неизменными свой знак и величину в течение всего времени измерения. К постоянным погрешностям можно отнести погрешности мер (например, гирь, концевых мер длины, катушек и магазинов сопротивления), погрешности от неправильной установки начала отсчета, неправильной градуировки и юстировки средств измерения, погрешности отношения двух плеч электроизмерительного моста, а также личные погрешности, которые у опытных наблюдателей при выполнении однородных наблюдений довольно постоянны. Эти погрешности вследствие их постоянства во всех повторных наблюдениях трудно обнаружить.

Переменные систематические погрешности подразделяют на прогрессивные, периодические и изменяющиеся по сложному закону.

Прогрессивными погрешностями называются погрешности, которые в процессе своего изменения либо все время возрастают, либо все время убывают (рис. 3,а). Такое монотонное изменение может происходить в функции времени, значения измеряемой величины или параметров внешних условий. Прогрессивная погрешность возникает, например, из-за постепенного падения напряжения аккумулятора или батареи, когда согласно методу измерения оно должно оставаться постоянным; из-за того, что размер делений измерительной линейки на несколько микронов больше или меньше миллиметра (погрешности возрастают тем больше, чем большая величина измеряется этой линейкой); при взвешивании, когда одно из коромысел весов находится ближе к источнику тепла, чем другое, поэтому быстрее нагревается и удлиняется и др.

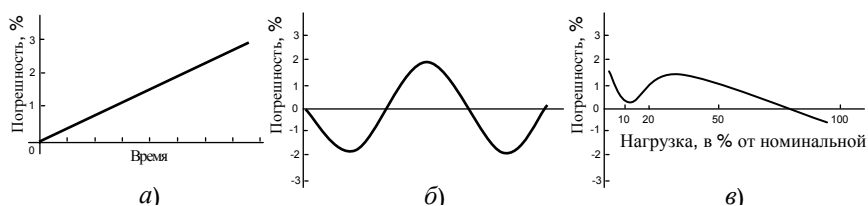


Рис. 3. Кривые погрешностей: а) – прогрессивной, б) – периодической, в) – изменяющейся по сложному закону

Периодическими погрешностями называются погрешности, которые периодически изменяют свое значение и знак (рис. 3,б). Такая погрешность присуща средствам измерения с круговой шкалой (секундомеры, индикаторы часового типа и др.), если ось вращения указателя не совпадает с осью шкалы. Так, например, если ось указателя секундомера расположена вверх от центра, то при вертикальном положении указателя конец будет показывать нуль, погрешности не будет, а при горизонтальном положении указателя его конец будет показывать не 15 с, а несколько меньше, погрешность будет отрицательная. При вертикальном положении указателя концом вниз погрешность снова будет равна нулю, при горизонтальном положении указателя концом влево показание будет больше 45 с, погрешность будет положительная. Следовательно, погрешности периодически меняются.

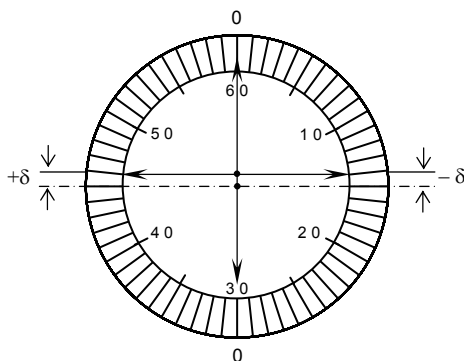


Рис. 4. Схема возникновения погрешностей из-за несовпадения оси вращения указателя с осью шкалы

Все остальные виды систематических погрешностей принято называть погрешностями, изменяющимися по сложному закону. Видный советский метролог М.Ф. Маликов дал следующее определение: Погрешности, изменяющиеся по сложному закону суть погрешности, закон изменения которых выражается более или менее сложной формулой или эмпирической кривой. В качестве примеров можно привести погрешности электрического счетчика, зависимость которых от нагрузки выражается кривой линией (рис. 3,в);

погрешности показаний измерительных приборов вследствие неправильного нанесения отметок на шкале и др.

Систематические погрешности, вызывающие смещение результата измерений часто становились причиной ошибочных научных выводов, установления ложных физических законов. Поэтому метрологи всех стран уделили большое внимание разработке способов отыскания, исключения и учета систематических погрешностей. Число этих способов столь же велико и они столь же разнообразны, как и сами способы измерения различных величин. Однако, несмотря на это разнообразие, все способы исключения и учета систематических погрешностей можно разделить на четыре группы:

1. Устранение источников погрешностей до начала измерения (профилактика погрешностей). Под устранением источника погрешностей понимают как непосредственное его удаление (например, удаление источника тепла, вибрации и т.д.), так и защиту измерительной аппаратуры и объекта измерения от влияния этих источников. Во многих случаях удается устранить источники инструментальных погрешностей; погрешностей возникающих в результате неправильной установки; погрешностей, возникающих вследствие внешних влияний.

2. Исключение погрешностей в процессе измерения (экспериментальное исключение погрешностей) способами замещения, компенсации погрешности по знаку, противопоставления, симметричных наблюдений.

Способ замещения заключается в том, что измеряемая величина заменяется в измерительной установке равновеликой ей известной, воспроизведенной мерой величиной, причем при такой замене в состоянии и действии измерительной установки никаких изменений не происходит. Тогда систематические погрешности, обусловленные свойствами измерительной установки, будут исключены. Вспомним способ взвешивания Борда, где взвешивание тела на одном плече позволило исключить погрешность от неравноплечности. Способ замещения успешно применяется при измерении электрических величин — индуктивности, емкости мостовым методом, что позволяет исключить влияние емкости на землю, влияние емкостей и индуктивностей сопротивлений, которые должны быть чисто активными и др.

Способ компенсации погрешности по знаку заключается в том, что измерения проводят дважды так, чтобы систематическая погрешность вошла в результаты измерения один раз с одним знаком, другой раз – с обратным знаком. Естественно, что полусумма значений, полученных в этих двух случаях, будет свободна от постоянной систематической погрешности. Пользуясь способом компенсации погрешности по знаку, можно исключить влияние поля земного магнетизма на показания прибора путем проведения двух измерений в исходном и повернутом на 180° состоянии с дальнейшим вычислением полусуммы результатов.

Способ противопоставления заключается в том, что измерения проводят дважды так, чтобы причина, вызывающая погрешность, оказала противоположное действие на результаты измерения. В качестве примера рассматривают обычно взвешивание на равноплечих весах по способу Гаусса. При первом взвешивании на одну чашку весов помещается тело, а на другую – уравнивающие его гири. Затем взвешенный груз перемещается с первой чашки на вторую и уравнивается гирями, помещенными на первую чашку. Масса тела равняется полусумме масс гирь, помещенных на различные чашки весов при первом и втором взвешиваниях. Описанным способом исключается погрешность от неравноплечности весов. Следует отметить, что причина погрешности в этом методе, в отличие от предыдущего, не дает погрешности обратных знаков, но действует на результат измерения один раз в одном направлении, другой раз – в противоположном (в рассматриваемом примере, если при первом измерении увеличивает вес гирь, то при втором – уменьшает его и наоборот). Способ противопоставления применяется также в равноплечих мостах при измерении электрического сопротивления на постоянном токе и др. случаях, когда исключение погрешностей происходит при сравнении измеряемой величины с мерой примерно равного значения.

Способ симметричных наблюдений применяется для исключения прогрессивной погрешности, изменяемой по линейному закону (рис. 5).

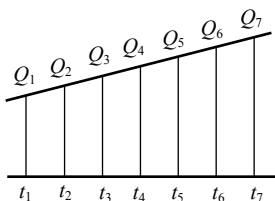


Рис. 5. График прогрессивной погрешности

Способ симметричных наблюдений заключается в том, что в результате проведенных через равные промежутки времени измерений сравниваются между собой средние арифметические наблюдений, симметрично расположенных в ряде наблюдений относительно среднего или средних наблюдений. Прогрессивная погрешность в этом случае будет исключена. Как видно из рис. 5, средние арифметические каждой пары значений прогрессивной погрешности, симметричных относительно некоторого момента времени, равны между собой. При четном числе наблюдений будем иметь

$$\frac{\theta_1 + \theta_6}{2} = \frac{\theta_2 + \theta_5}{2} = \frac{\theta_3 + \theta_4}{2},$$

при нечетном

$$\frac{\theta_1 + \theta_7}{2} = \frac{\theta_2 + \theta_6}{2} = \frac{\theta_3 + \theta_5}{2} = \theta_4.$$

Во многих случаях расположение наблюдений таким образом, чтобы сравнивать между собой средние арифметические симметрично расположенных наблюдений достигается повторением наблюдений в обратном порядке, заканчивая их той же операцией, которой они были начаты.

Исключению погрешностей в процессе измерения вышеописанными способами в основном поддаются инструментальные погрешности, погрешности от установки и погрешности от внешних влияний. Некоторые постоянные погрешности субъективного характера можно исключить в процессе измерения только путем проведения повторных измерений несколькими лицами.

3. Внесение известных поправок в результат измерения. Если природа систематической погрешности хорошо изучена и известна ее величина, то можно в результаты измерения путем вычисления внести соответствующую поправку (исправить результаты измерений). Наиболее распространенным случаем внесения поправок является алгебраическое сложение результата измерения и поправки (с учетом ее знака). Рекомендовано следующее определение

поправки: **поправка** – значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности. Поправка по числовому значению равна систематической и противоположна ей по знаку. В некоторых случаях погрешность исключают путем умножения результата измерения на поправочный множитель (поправочный множитель – число, на которое умножают результат измерения с целью исключения систематической погрешности). В отличие от поправки поправочным множителем пользуются тогда, когда погрешность пропорциональна показаниям средства измерений в пределах определенного диапазона измерения.

4. Оценка границ систематических погрешностей. К оценке границ систематических погрешностей прибегают в тех случаях, когда исключение систематических погрешностей практически невозможно (методы измерений, систематические погрешности которых недостаточно изучены) или когда систематические погрешности изучены, поддаются измерению и определению, однако не могут быть использованы для внесения поправок в результаты измерений (группа интегрирующих средств измерения).

При разработке нового метода измерения или новых средств измерений необходимо выявлять и изучать все возможные систематические погрешности. Пренебрежение этим правилом может привести к тому, что новые разработки и изобретения в области метрологии и измерительной техники на практике себя не оправдают.

5.2. Случайные погрешности

Случайная погрешность измерения – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Примерами случайных погрешностей являются погрешность вследствие вариации показаний измерительного прибора; погрешность округления при отсчитывании показаний измерительного прибора; погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях погрешность.

Обнаруживаются случайные погрешности при повторении измерения одной и той же величины в том, что числовые значения последовательных результатов несколько разнятся друг от друга и причины этого различия не поддаются контролю наблюдателя.

Причинами различия могут быть, например, колебания температуры, вызывающие различные изменения частей прибора (нерегулярные изменения моментов трения в опорах и др.), тряска или движение воздуха, вызывающие изменение в положении прибора (перекосы элементов приборов в их направляющих и др.), физиологические изменения органов чувств, вызывающие изменение внимания операторов, колебания электромагнитного поля при электрических измерениях и многие многие другие факторы, появляющиеся и исчезающие нерегулярно или проявляющиеся с интенсивностью, которую трудно предвидеть.

Каждый из перечисленных источников различия может оказывать и незаметное влияние на результат наблюдения, но их суммарное воздействие может оказаться существенным. Источники различия в каждый момент проявляют себя по-разному, без закономерной связи между собой, независимо друг от друга. Такой характер их влияния приводит к тому, что и суммарное их действие, т.е. заметные расхождения в результатах отдельных наблюдений, появляются без закономерной связи с предыдущими и последующими. Это и дало основание говорить о случайных погрешностях.

Характер появления случайных погрешностей предпрещает метод их изучения. В отличие от систематических погрешностей, о каждой отдельной случайной погрешности мы не можем иметь определенного суждения; только рассматривая ряды повторных измерений можно сделать определенные выводы о свойствах всей совокупности погрешностей и на основании этих выводов учесть их влияние на результат. Однако все наши выводы окажутся верными и возможной будет правильная оценка точности результатов только в том случае, если при рассмотрении рядов измерений мы будем предполагать, что из каждого измерения исключены систематические погрешности и промахи.

Изучение совокупности случайных погрешностей является предметом специального курса теории погрешностей. Теория погрешностей основывается на следующих двух закономерностях, принимаемых за аксиомы:

1. Аксиома случайности. При очень большом числе измерений случайные погрешности, численно равные по абсолютной величине, но противоположного знака, встречаются одинаково часто; число положительных погрешностей равно числу отрицательных.

2. Аксиома распределения. Чем больше случайные погрешности по своей величине, тем меньше их вероятность; малые погрешности встречаются чаще, чем большие; очень большие погрешности вовсе не встречаются.

Математическим аппаратом теории погрешностей является теория вероятностей и основанные на ней методы математической статистики.

Пусть при измерении некоторой величины было получено n отличающихся друг от друга результатов наблюдения

$$X_1, X_2, \dots, X_n.$$

Следовательно, результат наблюдений X за постоянной физической величиной Q может быть рассмотрен как случайная величина, принимающая различные значения X_i в различных наблюдениях за ней.

Случайная погрешность для i -того результата наблюдения определяется как разность между i -тым результатом наблюдения и истинным значением измеряемой величины, т.е.

$$\delta_i = X_i - Q.$$

Так как истинное значение измеряемой величины вследствие наличия во всех измерениях случайных погрешностей остается неизвестным, приходится брать некоторое значение, относительно которого у нас есть уверенность, что оно является наилучшим приближением к истинному значению.

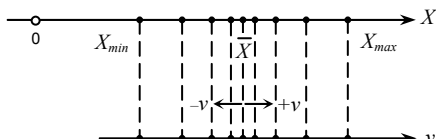
В качестве такого значения можно взять среднее арифметическое из всех результатов наблюдений

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}.$$

Разность между результатом наблюдения и средним значением называется случайным отклонением результата наблюдения или просто случайным отклонением и обозначается через v_i . Следовательно,

$$v_i = X_i - \bar{X}.$$

Рассматривая результат отдельного наблюдения X_i как случайную точку на оси OX , а случайного отклонения результата наблюдения v_i — как точку на оси OV , результаты всех n наблюдений и



случайных отклонений могут быть геометрически изображены следующим образом

Рис. 6.

Для уяснения характера распределения результатов наблюдения поступим следующим образом. Разобьем весь диапазон полученных результатов наблюдений $X_1, X_2, \dots, X_n$ на r интервалов равной ширины, подсчитаем число результатов m_i попавших в каждый интервал (частоты) и вычертим прямоугольники (столбики) с основанием, равным ширине интервалов и высотой, пропорциональной числу результатов, находящихся в данном интервале. В результате получим гистограмму статистического распределения результатов наблюдения, изображенную на рис. 7,а. Здесь число измерений, попавших в интервалы, условно обозначено количеством крестиков в столбике.

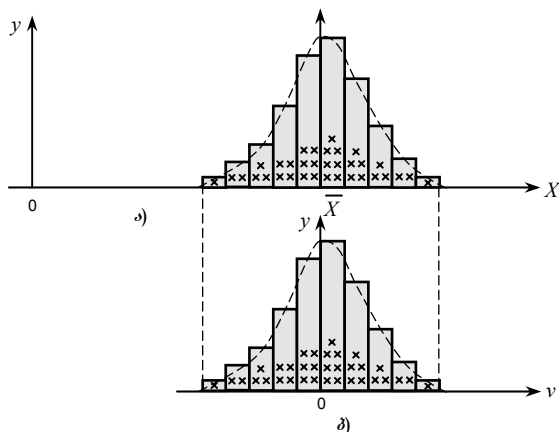


Рис. 7. Построение гистограмм распределения результатов наблюдения (а) и случайных отклонений результатов наблюдения (б)

Аналогичным образом может быть построена гистограмма распределения случайных отклонений результатов наблюдений

(рис. 7,б). Так как количество измерений, попавших в какой-либо интервал равно количеству случайных отклонений результатов наблюдений в том же интервале, гистограммы в обоих случаях будут иметь идентичный вид. Далее будем рассматривать только гистограммы, соответствующие распределению случайных отклонений результата наблюдения.

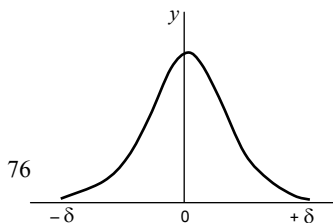
Так как все основания у столбиков равны, площадь столбиков, пропорциональная высоте, окажется пропорциональной числу случайных отклонений, заключающихся в каждом интервале. Вся площадь диаграммы окажется пропорциональной общему числу случайных отклонений n . Обычно вдоль оси y откладывают не частоты, а частотности $p_i^* = m_i/n$, представляющие статистические оценки вероятностей попадания результата наблюдений в i -тый интервал. В этом случае площадь диаграммы окажется равной единице. На графике это отразится лишь изменением масштаба диаграммы вдоль оси y .

В специальной литературе доказывается, что при неограниченном увеличении числа измерений среднее арифметическое стремится к истинному значению измеряемой величины, а случайные отклонения результата наблюдения – к равенству с соответствующими случайными погрешностями, т.е.

$$v_i = \delta_i.$$

Это означает, что при достаточно большом числе измерений совокупность случайных отклонений результата наблюдения подчиняется тем же закономерностям, что и совокупность случайных погрешностей и, следовательно, все теоретические выводы и предложения, относящиеся к случайным погрешностям, могут быть проверены на основании данных большого числа наблюдений и применены к случайным отклонениям результата наблюдения. Этот факт весьма важен, так как в действительности ни истинное значение измеряемой величины, ни случайные погрешности нам не известны.

Возвратимся к рисунку 7,б. Если увеличить число измерений (а, следовательно, и случайных отклонений) и разбивать его на большее число групп с еще меньшим интервалом, то мы получим ступенчатую линию, ограничивающую



диаграмму, все более приближающуюся к плавной кривой, изображенной пунктиром на рис. 7,б и отдельно на рис. 8. Так как в этих условиях, согласно вышесказанному, случайные отклонения результата наблюдения совпадают со случайными погрешностями, то эта кривая распределения относится также к случайным

Рис.8 погрешностям.

Аналитическое выражение кривой распределения, представленное в виде функции

$$y = \varphi(\delta),$$

называется функцией распределения. Функция распределения является самым универсальным способом описания поведения случайных погрешностей. Однако для определения этой функции (кривой) необходимо проведение весьма большого числа экспериментов, кропотливых научных исследований и обширных вычислительных работ. Поэтому к такому способу описания случайных погрешностей прибегают лишь иногда при исследовании принципиально новых мер и измерительных устройств.

В большинстве же случаев бывает достаточно охарактеризовать случайные погрешности с помощью ограниченного числа специальных величин, называемых моментами. Наиболее часто применяемыми моментами являются математическое ожидание и дисперсия σ^2 , поскольку они определяют наиболее важные черты распределения: положение центра распределения и степень его разбросанности (рис. 9,а). Для более подробного описания распределения используются моменты более высоких порядков, характеризующие асимметрию (скошенность) распределения (рис. 9,б) и островершинность (плосковершинность распределения) (рис. 9,в).

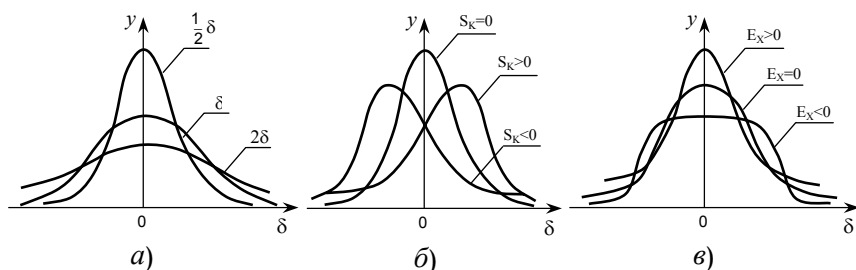


Рис. 9

Изображенная на рис. 8 кривая известна как кривая нормального распределения случайных погрешностей. Аналитическое выражение кривой нормального распределения случайных погрешностей может быть получено разными методами и имеет следующий вид

$$y = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (5.1)$$

где y – означает частоту появления случайных погрешностей определенного значения δ ; σ^2 – дисперсия результата наблюдения.

В качестве характеристики рассеивания удобнее использовать не дисперсию, имеющую размерность квадрата случайной величины, а среднее квадратическое отклонение результата наблюдения, имеющее ту же размерность, что и сама случайная величина, а в нашем случае и случайные погрешности. Поэтому среднее квадратическое отклонение иногда называют средней квадратической погрешностью.

Среднее квадратическое отклонение результата наблюдения – это параметр функции распределения результатов наблюдений, характеризующий их рассеивание и равный корню квадратному из дисперсии результата наблюдения (с положительным знаком), т.е.

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}}, \quad (5.2)$$

где $n \rightarrow \infty$ и это показывает, что рассматривается неограниченно большое число погрешностей, а δ_i – случайная погрешность i -того наблюдения.

Из формулы (5.1) видно, что параметр σ_x полностью определяет данную совокупность случайных погрешностей. Действительно, чем меньше σ_x , тем больше по абсолютной величине отрицательный показатель при e , а следовательно, тем быстрее уменьшается y и круче падает кривая (рис. 9,а). С другой стороны, чем меньше σ_x , тем больше множитель, стоящий перед e , и тем больше ордината, соответствующая нулевому значению случайной погрешности. И, наоборот, чем больше σ_x , тем медленнее умень-

шается y , кривая падает более полого, и тем меньше ордината, соответствующая $\delta = 0$. Таким образом, малому значению σ_x соответствует преобладание малых случайных погрешностей, а следовательно, и большая точность измерения; при большом σ_x крупные случайные погрешности встречаются значительно чаще, а, следовательно, и точность измерения меньше. На основании этого был сделан вывод, что среднее квадратическое отклонение результата наблюдений вполне определенным образом и однозначно характеризует точность измерения, т.е. степень достоверности получаемых числовых значений измеряемой величины.

Вероятность того, что случайные погрешности не выйдут за пределы $\pm \sigma$ (а, следовательно, результаты наблюдения за пределы $X \pm \sigma$), равна 0,6826 (определяется заштрихованной на рис.10 площадью), за пределы $\pm 2\sigma$ равна 0,9546, $\pm 3\sigma - 0,9973$. Последнее значит, что из 370 погрешностей только одна погрешность будет больше 3σ . А так как обычно проводимое на практике число измерений не превышает нескольких десятков, то появление погрешности в 3σ мало вероятно. Это и обусловило название случайной погрешности $\delta = 3\sigma$ наибольшей возможной или предельной погрешностью ряда измерений.

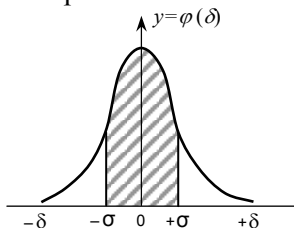


Рис.10. Кривая нормального распределения случайных погрешностей и среднее квадратическое отклонение $\pm \sigma$

Для практических целей более интересна обратная задача: для любой наперед заданной вероятности p найти интервал, называемый доверительным, между границами которого с этой вероятностью (доверительной) находятся случайные погрешности (случайные отклонения).

Верхняя и нижняя границы интервала, накрывающего с заданной вероятностью случайное отклонение результата наблюдения, называются доверительными границами случайного отклонения результата наблюдения (доверительными отклонениями). При симметричных границах, которые имеют место в нашем случае, этот термин применяется в единственном числе. Доверительная граница случайного отклонения результата наблюдения равна половине длины доверительного интервала $[-t_p\sigma_x; +t_p\sigma_x]$, т.е. $t_p\sigma_x$, где t_p , зависящее от доверительной вероятности p значение коэффициента, находится из специальных таблиц. В этом случае истинное значение Q измеряемой величины с доверительной вероятностью p находится между границами доверительного интервала $[X - t_p\sigma_x; X + t_p\sigma_x]$.

При ограниченном числе наблюдений можно найти только оценку S_x среднего квадратического отклонения результата наблюдения, обычно принимаемую равной корню квадратному из оценки S_x^2 дисперсии результата наблюдения

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (5.3)$$

Эта оценка в дальнейшем используется для определения оценок доверительных отклонений $t_p S_x$.

Выведенная формула представляет собой погрешность отдельного наблюдения из целого ряда произведенных наблюдений. На практике же при измерении требуется дать результат измерения (в качестве него мы условились брать среднее арифметическое наблюдений) и погрешность этого результата. Погрешность результата измерения же отличается от погрешности наблюдения. Среднее арифметическое результатов бесконечно большого числа наблюдений, как мы уже знаем, стремится к истинному значению измеряемой величины; при этом погрешность этого результата стремится к нулю. На практике же, будучи вычисленным на основе ограниченного числа опытов, среднее арифметическое само является случайной величиной. В этом легко убедиться проводя повторные серии измерений той же величины из n наблюдений и вычисляя

каждый раз новые средние арифметические $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots$. Они отличаются от истинного значения на величины $\delta_{\bar{X}_1}, \delta_{\bar{X}_2}, \dots$, являющиеся случайными погрешностями среднего арифметического значения. Если случайные погрешности результатов отдельных наблюдений подчиняются нормальному закону распределения, то и погрешности средних значений их повторных рядов будут подчиняться этому же закону, но с меньшим рассеиванием. Рассеивание результатов измерений характеризует среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Среднее квадратическое отклонение результата измерения – это параметр функции распределения результатов измерений, характеризующий их рассеивание и равный корню квадратному из дисперсии результата измерения (с положительным знаком), т.е.

$$\sigma_{\bar{X}} = +\sqrt{\sigma_{\bar{X}}^2} = +\sqrt{\frac{\delta_{\bar{X}_1}^2 + \delta_{\bar{X}_2}^2 + \dots + \delta_{\bar{X}_N}^2}{N}}, \quad (5.4)$$

где $N \rightarrow \infty$.

Теория погрешностей показывает, что среднее квадратическое отклонение (погрешность) результата измерения, т.е. среднего арифметического из результатов n наблюдений, в $\sqrt{n}$ раз меньше, чем среднее квадратическое отклонение (погрешность) результата наблюдения, т.е.

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}}. \quad (5.5)$$

При ограниченном числе измерений можно найти только оценку среднего квадратического отклонения результата измерения, обычно принимаемую равной корню квадратному из оценки дисперсии результата измерения

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{S_{\bar{X}}^2} = \sqrt{\frac{S_X^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}. \quad (5.6)$$

Полученные оценки истинного значения измеряемой величины и среднего квадратического отклонения результата измерения позволяют записать итог измерений в виде

$$Q = \bar{X} \pm S_{\bar{X}}. \quad (5.7)$$

Погрешности результата измерения указывают, какие цифры в его числовом значении являются сомнительными. Поэтому нет смысла выражать погрешность большим числом цифр (обычно ограничиваются только одной значащей цифрой или двумя при ответственных и точных измерениях). Результат измерения округляют таким образом, чтобы его числовое значение оканчивалось цифрой того же разряда, что и значение погрешности. При округлении используют следующие правила:

1. Лишние цифры у целых чисел заменяются нулями, а у десятичных дробей отбрасываются.

Получены результаты измерений:

После округления имеем:

$$Q_1 = 153357 \pm 681 =$$

$$Q_1 = 153400 \pm 700$$

$$Q_2 = 421,3841 \pm 0,127$$

$$Q_2 = 421,4 \pm 0,1 \text{ или } Q_2 = 421,38 \pm 0,13$$

Если десятичная дробь в числовом значении результата измерения оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

Получены результаты измерений:

После округления имеем:

$$Q_3 = 2,0700 \pm 0,001 =$$

$$Q_3 = 2,070 \pm 0,001$$

2. 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.

Так, например, при сохранении четырех значащих цифр имеем

Получены результаты измерений:

После округления имеем:

$$Q_4 = 253435 \pm 692 =$$

$$Q_4 = 253400 \pm 700$$

$$Q_5 = 235,435 \pm 0,218$$

$$Q_5 = 235,4 \pm 0,2$$

3. 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.

Например, при сохранении трех значащих цифр число 18598 округляют до 18600, число 152,56 – до 153.

Получены результаты измерений:

После округления имеем:

$$Q_6 = 18598 \pm 811 =$$

$$Q_6 = 18600 \pm 800$$

$$Q_7 = 152,56 \pm 2,13$$

$$Q_7 = 153 \pm 2$$

4. 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.

Например, при сохранении двух значащих цифр число 22,5 округляют до 22, число 23,5 – до 24.

Получены результаты измерений:

$$Q_8 = 22,500 \pm 1,32 =$$

$$Q_9 = 23,5 \pm 1,8$$

После округления имеем:

$$Q_8 = 22 \pm 1$$

$$Q_9 = 24 \pm 2$$

Интервал $\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$ с некоторой вероятностью «накрывает» истинное значение Q измеряемой величины.

Для любой напередзаданной вероятности p здесь, так же как и ранее, может быть найден доверительный интервал, между границами которого с этой вероятностью находятся случайные погрешности результатов измерения (средние квадратические отклонения результата измерения).

Верхняя и нижняя границы интервала, накрывающего с заданной вероятностью погрешность измерения, называются доверительными границами погрешности результата измерения (доверительными погрешностями). При симметричных границах, которые имеют место в нашем случае, этот термин применяется в единственном числе. Доверительная граница погрешности результата измерения равна половине длины доверительного интервала $[-t_p \sigma_{\bar{X}}; +t_p \sigma_{\bar{X}}]$, т.е. $t_p \sigma_{\bar{X}}$. Относительно коэффициента t_p мы уже говорили выше и повторяться не будем. Вместо $\sigma_{\bar{X}}$ в практической деятельности приходится пользоваться ее оценкой $S_{\bar{X}}$. Следовательно, истинное значение Q измеряемой величины с доверительной вероятностью p находится между границами доверительного интервала $[\bar{X} - t_p S_{\bar{X}}; \bar{X} + t_p S_{\bar{X}}]$, т.е. $Q = \bar{X} \pm t_p S_{\bar{X}}$.

Таким образом, поставленная перед нами задача оценки по данным свободного от систематических погрешностей ряда наблюдений результата измерения и погрешности этого результата полностью решена.

5.3. Промахи и грубые погрешности

Промахи – неоправдываемые объективными условиями измерений погрешности, приводящие к явному и резкому искажению результата измерения. Промахи обычно вызываются неправиль-

ными действиями наблюдателя, вследствие его неопытности, небрежности, невнимательности, утомления и других причин.

По своему характеру промахи весьма разнообразны. Перечислим наиболее характерные и чаще всего встречающиеся промахи.

1. Неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверной оценки значений нанесенных делений шкалы (например, значение пяти делений принимается за значение десяти; отметки, указывающие пятые части интервала, принимаются за отсчеты, указывающие десятые части и т.д.); отсчета, сделанного не в том направлении, в котором градуирована шкала (например, отсчет 8,2 вместо 7,8); отсчета при неверном счете делений (например, отсчет 2,36 вместо 2,86).

2. Неправильная запись результата наблюдения (описка), неправильная запись значений отдельных мер, например, значение массы гирь, положенных на чашку весов. Частой опiskой является перестановка цифр 6 и 9, например, записывают 269 вместо 296 или наоборот.

3. Пропуски в наблюдениях или записях.

4. Неполнота наблюдений.

5. Наблюдения, основанные на неверном представлении об устройстве или действии приборов.

6. Неправильные манипуляции с приборами или различными частями измерительной установки. Неправильная схема включения приборов.

7. Изменение расположения приборов при манипуляциях, влияющее на их показания и вовремя не замеченное.

8. Отсчет неисправного прибора.

Общие приемы контроля измерений с целью обнаружения промахов и их своевременного устранения основаны на устранении возможных причин промахов. В основном это контрольные, приближенные измерения той же величины другим методом и другой измерительной установкой; совместные измерения (в тех случаях, когда измеряемая величина связана определенным соотношением с другими величинами) и др. В отдельных случаях могут быть применены специальные эффективные приемы контроля измерений. Промахи обычно опасны при однократных измерениях. Чем больше становится ряд повторных измерений, тем легче обнаружить промах.

Грубые погрешности измерения – погрешности измерения, существенно превышающие ожидаемую при данных условиях погрешность. Эти неоправданные объективными условиями измерений погрешности вызывают слишком большие отклонения отдельных наблюдений в ряде остальных наблюдений (дают большие по абсолютной величине случайные отклонения результата наблюдения).

Причинами грубых погрешностей служат резкие кратковременные изменения условий измерений (механический толчок или тряска, задержка или скачки в действии приборов, резкие колебания их чувствительности, резкие колебания внешних условий (внезапное падение напряжения в сети электропитания, струя холодного воздуха из открытой двери) и др. Провести резкую грань между промахом и грубой ошибкой не всегда удастся. Так, например, наблюдатель, случайно облокотившийся во время наблюдения на стол, на котором установлена зрительная труба, может изменить ее положение так, что полученное при помощи трубы показание будет резко отличаться от ряда других; наблюдатель в этом случае, несомненно, делает промах, выражающийся в виде грубой погрешности. Поэтому часто грубые погрешности также относят к промахам.

Вообще говоря, промахи и грубые погрешности, обнаруженные в процессе измерений (замеченные неправильный отсчет, причины, способные вызвать грубую погрешность) могут быть отброшены и для вычисления результата измерения не приняты. Однако здесь уместно процитировать предостережение видного русского метролога М.Ф.Маликова «... одного только факта резкого отличия наблюдения от остальных еще недостаточно, чтобы это наблюдение отбросить. Стремление отбрасывать наблюдения, резко отклоняющиеся от других, и заменять их новыми наблюдениями, чтобы получить таким образом сглаженный ряд измерений, особенно заметное среди начинающих, заслуживает большого порицания, как дурная привычка. Наблюдатель должен выработать у себя навыки беспристрастно относиться к исходу измерения в полной уверенности, что все наблюдения, сделанные им с одинаковой тщательностью и добросовестностью, заслуживают одинакового доверия. В сомнительных случаях лучше сделать дополнительное наблюдение, но не взамен сомнительного, а в дополнение к нему».

По окончании измерений вопрос об устранении промахов из полученного экспериментального материала ставится особенно остро. В данном случае обстоятельства эксперимента уже не могут быть учтены и о наличии промахов приходится судить лишь по чрезмерно большим отклонениям результатов отдельных измерений по отношению к остальным. Поступать в данном случае надо крайне осторожно: отбрасывая без оснований результаты отдельных измерений при небольшом числе измерений, можно получить искаженное значение среднего арифметического; такой же результат будет получен при оставлении без достаточных оснований наблюдения, резко отличающегося от других – влияние этого наблюдения может оказаться несоразмерно большим по сравнению с другими наблюдениями, искажающим истинную картину. Проверка сомнительных наблюдений осуществляется общими методами проверки статистических гипотез. Из известных в литературе критериев проверки сомнительных наблюдений (критериев грубых погрешностей) отметим критерий Райта, Шовене, Романовского и др. Согласно критерию Райта, например, наблюдение содержит несомненный промах, если случайное отклонение больше $4S$ (среднее квадратическое отклонение S вычисляется по всем данным). Такое наблюдение должно быть отброшено. Если случайное отклонение больше $3S$, есть основание предполагать наличие промаха, однако вопрос об отбрасывании этого наблюдения должен быть решен с учетом условий проведения данного опыта.

После отбрасывания промахов и грубых погрешностей необходимо заново произвести все вычисления.

Внимательное ознакомление с материалами данного и предыдущих параграфов дает возможность творчески воспринять установленные стандартами определения характеристик качества измерений.

Точность измерений – качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерений – качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

Сходимость измерений – качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях.

Воспроизводимость измерений – качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях, в различное время, в различных местах, разными методами и средствами.

5.4. Погрешность и неопределенность

Разделение погрешности измерения на случайную и систематическую и построенные на таком разделении методы ее описания в последнее время стало подвергаться определенной критике. Дело в том, что модели погрешностей, значения доверительных интервалов в разных странах мира отличаются друг о друга, что приводит к определенным трудностям при сличении результатов измерений, полученных в лабораториях разных стран.

Для устранения этих сложностей с участием ряда международных организаций был разработан документ «Руководство для выражения неопределенности в измерении», содержащий новую концепцию описания результатов измерений. Основными положениями этого документа являются:

- отказ от использования таких понятий, как истинное и действительное значения измеряемой величины, погрешность, относительная погрешность, точность измерения, случайная и систематическая погрешности;

- введение нового термина «неопределенность» – параметра, связанного с результатом измерения и характеризующего дисперсию значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине;

- разделение составляющих неопределенности на два типа: А и В. Вновь вводимые группы неадекватны случайным и систематическим погрешностям. Разделение основано не на теоретических предпосылках, а на практических соображениях.

Неопределенности типа А могут быть оценены статистическими методами на основе многократных измерений и описываются традиционными характеристиками централизованных случайных величин – дисперсией или средним квадратическим отклонением. Взаимо-

действие неопределенностей типа А описывается взаимным корреляционным моментом или коэффициентом взаимной корреляции.

Неопределенности типа В могут быть оценены любыми другими методами, кроме статистических. Они должны описываться величинами, аналогичными дисперсии или среднему квадратическому отклонению, так как именно эти характеристики можно использовать для объединения неопределенностей типа В как между собой, так и с неопределенностями типа А.

С нашей точки зрения понятие «неопределенность измерения» надо вводить в практику, но не вместо понятия «погрешность», а наряду с ним.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение погрешности измерения.
2. Перечислите виды погрешностей.
3. Дайте определение систематических погрешностей.
4. Какие группы систематических погрешностей различают в зависимости от причин их возникновения?
5. Что из себя представляют инструментальные погрешности? Перечислите возможные проявления инструментальных погрешностей.
6. В чем заключаются погрешности метода или теоретические погрешности. Приведите примеры погрешностей метода.
7. Какие погрешности называются погрешностями установки?
8. Приведите примеры погрешностей, возникающих вследствие внешних влияний.
9. Дайте определение субъективных систематических погрешностей и приведите их примеры.
10. На какие классы разделяются систематические погрешности по характеру своего поведения?
11. В чем отличие аддитивных и мультипликативных систематических погрешностей? Из-за чего возникают прогрессивные погрешности?
12. Приведите пример возникновения периодической погрешности.
13. Перечислите способы исключения и учета систематических погрешностей.
14. Какими способами осуществляется исключение систематических погрешностей в процессе измерения?
15. Как осуществляется внесение поправок в результат измерения?
16. В каких случаях прибегают к оценке границ систематических погрешностей?
17. Дайте определение случайной погрешности измерения.
18. На каких закономерностях основывается теория погрешностей?
19. Что из себя представляет гистограмма распределения случайных отклонений результатов наблюдений и как она строится?
20. Какими величинами достаточно бывает охарактеризовать случайные погрешности?

21. Что из себя представляет среднее квадратическое отклонение результата наблюдения? результата измерения?

22. Что вы знаете о точечном и интервальном оценивании погрешностей измерения?

23. Перечислите правила округления результатов измерений.

24. Перечислите наиболее характерные и чаще всего встречающиеся промахи.

25. Дайте определение грубых погрешностей измерений и назовите причины их возникновения.

26. Перечислите основные положения документа «Руководство для выражения неопределенности в измерении».

6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Метрологическое обеспечение – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

6.1. Цели и задачи метрологического обеспечения

Основными целями метрологического обеспечения являются:

- а) повышение качества продукции, эффективности управления производством и уровня автоматизации производственных процессов;
- б) обеспечение взаимозаменяемости деталей, узлов и агрегатов, создание необходимых условий для кооперирования производства и развития специализации;
- в) повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, экспериментов и испытаний;
- г) обеспечение достоверности учета и повышение эффективности использования материальных ценностей и энергетических ресурсов;
- д) повышение эффективности мероприятий по профилактике, нормированию и контролю условий труда и быта людей, охране окружающей среды, оценке и рациональному использованию природных ресурсов;
- е) повышение уровня автоматизации управления транспортом и безопасности его движения;
- ж) обеспечение высокого качества и надежности связи.

В области метрологического обеспечения на государственном уровне должны решаться следующие задачи:

- определение основных направлений развития метрологического обеспечения и путей наиболее эффективного использования научных и технических достижений в этой области;

- разработка научно-методических, технико-экономических, правовых и организационных основ метрологического обеспечения на всех уровнях управления народным хозяйством;

- Организация и проведение фундаментальных научных исследований по изысканию и использованию новых физических эффектов с целью создания и совершенствования методов и средств измерений высшей точности и определения значений физических констант;

- обеспечение единства измерений в стране, стандартизация основных положений, правил, требований и норм метрологического обеспечения;

- установление допускаемых к применению единиц физических величин;

- установление системы государственных эталонов единиц физических величин, их создание, утверждение, совершенствование и хранение;

- установление единого порядка передачи размеров единиц физических величин от государственных эталонов всем средствам измерений;

- разработка межотраслевых программ метрологического обеспечения и организация работ по их осуществлению;

- создание и совершенствование рабочих эталонов и образцовых средств измерений высшей точности, планирование и координация разработок комплексных поверочных установок и лабораторий;

- установление единых требований к метрологическим характеристикам средств измерений;

- установление порядка, планирование и проведение государственных испытаний средств измерений, предназначенных для серийного или массового производства и ввода их из-за границы партиями, утверждение типов средств измерений, допущенных к применению в данной стране;

- государственная поверка средств измерений;

- установление общих требований к стандартным образцам состава и свойств веществ и материалов;

- осуществление руководства государственной службой стандартных справочных данных, государственной службой стандарт-

ных образцов веществ и материалов, государственной службой времени и частоты и обеспечение их развития;

- государственный надзор за производством, состоянием, применением и ремонтом средств измерений, и соблюдением метрологических правил, требований и норм, а также за деятельностью ведомственных метрологических служб;

- организация и выполнение особо точных измерений;

- организация и осуществление подготовки и повышения квалификации кадров в области метрологии;

- организация работ по международному сотрудничеству в области метрологии, обеспечения единства и требуемой точности измерений, необходимых для международной торговли, научно-технического и экономического сотрудничества и др.

На отраслевом уровне решение задач в области метрологического обеспечения осуществляет соответствующее министерство (ведомство). Кроме основных задач обеспечения единства измерения здесь должны решаться и такие дополнительные, специфичные для деятельности по метрологическому обеспечению задачи как:

- выбор номенклатуры параметров материалов, изделий, процессов, подлежащих оценке при измерениях, испытаниях и контроле;

- выбор номенклатуры и числовых значений показателей точности (достоверности) результатов измерений, испытаний и контроля, форм их представления, обеспечивающих оптимальное решение задач, для которых эти результаты предназначены;

- метрологическая экспертиза проектной, конструкторской и технологической документации с целью контроля правильности результатов решения двух предыдущих задач;

- планирование процессов измерений, испытаний и контроля, разработка методик измерений, испытаний и контроля;

- обеспечение процессов измерений, испытаний и контроля соответствующими техническими средствами (средствами измерений, испытательным оборудованием, средствами контроля);

- поддержание технических средств в метрологически исправном состоянии;

-выполнение процессов измерений, испытаний и контроля, обработка результатов измерений, испытаний и контроля в тех случаях, когда это требуется.

Конечная цель метрологического обеспечения – свести к рациональному минимуму возможность принятия ошибочных решений по результатам измерений, испытаний и контроля сырья, материалов, изделий и процессов. Для достижения этой цели необходимо комплексное решение всех задач метрологического обеспечения.

6.2. Единство и точность измерений

Возможность применения результатов измерений для правильного и эффективного решения любой измерительной задачи определяется следующими тремя условиями: *а)* результаты измерений выражаются в установленных единицах; *б)* с необходимой заданной достоверностью известны значения показателей точности этих результатов; *в)* значения показателей точности обеспечивают оптимальное решение задачи, для которой эти результаты предназначены.

Если результаты измерений удовлетворяют первым двум условиям, то о них известно все, что необходимо знать для принятия обоснованного решения о возможности их использования. Такие результаты можно сопоставлять, они могут использоваться в различных сочетаниях, различными людьми и организациями. В этом случае говорят, что обеспечено единство измерений, т.е. такое состояние измерений, при котором их результаты выражаются в установленных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Третье из вышеперечисленных условий определяет специфические требования к точности применяемых методов и средств измерений.

Для обеспечения единства измерений необходимо было: *а)* создать и регламентировать такие правила подготовки и проведения измерений, обработки и оформления их результатов, соблюдение которых гарантирует определенную точность всех выполняемых по данным правилам измерений; *б)* включить в сферу деятельности метрологической службы процессов и результатов измерений. При этом традиционные задачи, связанные с обеспечением единообразия измерений вошли в комплекс задач по обеспечению единства измерений, который включает установление и разработку:

- допускаемых к применению единиц измеряемых величин (параметров);
- методов и средств воспроизведения и хранения размеров единиц измеряемых величин (параметров);
- методов и средств передачи размеров единиц от эталонов рабочим средствам измерений;
- методов испытаний и поверки средств измерений;
- номенклатуры, принципов нормирования, оценки и контроля метрологических характеристик средств измерений;
- форм выражения результатов и показателей точности измерений.
- методов расчета показателей точности методик выполнения измерений.

Общие правила решения указанных задач были регламентированы основополагающими стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), которые в свою очередь послужили базисом для разработки большого числа государственных и отраслевых стандартов, других нормативных документов этой системы, конкретизирующих требования, нормы, правила обеспечения единства измерений применительно к отдельным видам и областям измерений, типам средств измерений.

Выполнение метрологических правил, обязательность которых устанавливается нормативно-техническими документами ГСИ, обеспечивает гарантированную точность результатов измерений.

6.3. Техническая база метрологического обеспечения

Техническая база метрологического обеспечения – это средства измерений. Понятие «средство измерения» является одним из важнейших в теоретической метрологии. Удачным можно считать следующее определение: средство измерений – 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 пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Основными классификационными признаками средств измерений являются тип, вид и метрологическое назначение.

Тип – это совокупность средств измерений, имеющих одинаковую принципиальную схему, конструкцию и изготавливаемых по одним и тем же техническим условиям.

Вид – это совокупность типов средств измерений, предназначенных для измерений какой-либо одной физической величины.

По принципу действия и конструктивным особенностям (по типам) средства измерений подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные системы.

Меры представляют собой средства измерений, служащие для воспроизведения физической величины заданного размера. Различают однозначные меры, воспроизводящие физическую величину одного размера, и многозначные меры, воспроизводящие ряд одноименных величин различного размера (например, линейки с делениями). Специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера, образует набор мер (набор гирь, набор концевых мер длины, набор измерительных конденсаторов и др.). Набор мер, объединенных в одно конструктивное целое, со специальными переключателями, которые связаны с отсчетными устройствами называется магазином мер (магазины сопротивления, магазины индуктивности, магазины емкости).

К мерам относятся также стандартные образцы и образцовые вещества.

Измерительный прибор – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы весьма разнообразны и отличаются конструкцией, принципом действия, но общим для них является наличие отсчетных устройств. По способу отсчета значений измеряемых величин приборы подразделяются на показывающие, т.е. допускающие только отсчитывание показаний, и регистрирующие, в которых предусмотрена и регистрация показаний. У аналоговых приборов отсчетные устройства обычно состоят из шкалы и указателя стрелки, а показания цифровых измерительных приборов представлены в цифровой форме.

Измерительным преобразователем называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Они самостоятельного применения не имеют, являются составной частью измерительных устройств, а значит применяются лишь совместно с другими средствами измерений.

Измерительная система – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Метрологическое назначение («метрологическая соподчиненность») средств измерения подразумевает их разбиение на *рабочие* (используемые непосредственно для получения количественной информации) и *образцовые* (применяемые при градуировке, аттестации и поверке рабочих средств измерений). Образцовые средства измерений образуют «цепочку», по которой передаются размеры единиц измеряемых величин от высшей ступени государственной поверочной схемы – эталонов к рабочим средствам измерений.

В связи с вышесказанным большое значение приобретают *метрологические характеристики свойств средств измерений* – характеристики, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средств измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки инструментальной погрешности. Комплексы нормируемых метрологических характеристик наряду с возможностью оценок инструментальных составляющих погрешностей измерений должны обеспечивать решение традиционных для метрологической практики задач: а) выбор средств измерений по известным условиям их применения и требуемой точности измерений; б) сравнение средств измерений различных типов с учетом условий их применения; в) разработку сложных измерительных систем, рациональный выбор их компонентов, оценку погрешностей систем по известным характеристикам их компонентов.

Комплекс нормируемых метрологических характеристик должен позволить оценить и описать следующие четыре составляющих погрешности измерений, обусловленной свойствами используемых средств измерений:

- погрешность, обусловленная отличием действительной функции преобразования средств измерений в нормальных условиях от номинальной, приписанной соответствующим нормативно-техническим документом типу средств измерения – основная погрешность;

- погрешности, обусловленные реакцией средств измерений на изменение внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относительно их нормальных значений – дополнительные погрешности;

- погрешность, обусловленная реакцией средств измерений на скорость (частоту) изменения входного сигнала, а значит характеризующая динамическую погрешность;

- погрешность, обусловленная изменением значения измеряемой величины за счет взаимодействия объекта и средства измерений.

В основе рационального выбора комплексов нормируемых метрологических характеристик для различных средств измерений лежат два требования: *а)* нормируемые метрологические характеристики должны отражать реальные свойства средств измерений и их номенклатура должна быть достаточной для оценки инструментальной составляющей погрешности измерений в допустимых условиях применения средств измерений с той степенью достоверности, которая требуется для решения поставленной измерительной задачи; *б)* не следует нормировать те метрологические характеристики, которые оказывают незначительное (по сравнению с другими) влияние на инструментальную погрешность измерений.

6.4. Метрологическая служба

В организационном отношении метрологическое обеспечение обеспечивается Государственной метрологической службой, а также метрологическими службами органов государственного управления (министерств, ведомств) и метрологическими службами юридических лиц (предприятий, организаций).

Государственной метрологической службой (ГМС) называется сеть государственных метрологических органов и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений в стране. В состав ГМС в России, например, входят: государственные научные метрологические центры; органы Государственной метрологической службы на территориях республик, в составе автономной области, автономных округов, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга.

Государственных научных метрологических центров в России представлены такими институтами как Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС, Москва), научно-производственное объединение «ВНИИ метрологии имени Д.И. Менделеева» (ВНИИМ, Санкт-Петербург), научно-производственное объединение «ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ, Московская область), Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, Новосибирск), Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ, Екатеринбург), Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (ВНИИР, Казань), Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВС ВНИИФТРИ, Иркутск).

Государственные научные метрологические центры проводят исследования в области теории измерений, разработки научно-методических основ совершенствования системы измерений в стране, разрабатывают нормативные документы по обеспечению единства измерений, являются хранителями государственных эталонов. Так, например, главным центром государственных эталонов в области измерений масс, малых и средних длин, углов, малых давлений, сил, электрических, магнитных, температурных, теплофизических и др. является ВНИИМ, в области времени и частоты, радиотехнических, акустических и гидродинамических измерений, измерений ионизирующих излучений, высоких давлений, температурных и теплофизических измерений в области низких температур и др. – ВНИИФТРИ, в области измерений расходов, вместимостей жидкостей и газов, физико-химических свойств и состава нефти и нефтепродуктов – НИИР, в области измерений параметров электрических цепей и электромагнитных

характеристик материалов на высоких и сверхвысоких частотах и др. – СНИИМ.

В Грузии под руководством выдающегося грузинского метролога Г.П. Зедгинидзе в 1964 году был создан крупнейший в Кавказском регионе метрологический центр – Тбилисский филиал ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Г.П. Зедгинидзе быстро вывел Тбилисский филиал ВНИИМ в число крупнейших метрологических центров, преобразовав его в дальнейшем во Всесоюзный научно-исследовательский институт автоматизации средств метрологии (ВНИИАМС) (впоследствии научно-производственное объединение «Исари») ставший центром государственных эталонов в области измерений pH, электропроводности растворов.

В состав Государственной метрологической службы России входят свыше 100 региональных центров стандартизации, метрологии и сертификации, расположенных на всей территории РФ, городов Москвы и Санкт-Петербурга. Основными функциями региональных центров являются: а) государственный метрологический контроль и надзор за обеспечением единства измерений в регионе; б) метрологическое обеспечение предприятий и организаций; в) поверка и калибровка средств измерений; г) аккредитация поверочных и калибровочных лабораторий; д) обучение и аттестация поверителей; е) разработка новых средств измерений; ж) техническое обслуживание и ремонт средств измерений.

К числу государственных служб, обеспечивающих единство измерений в стране относятся также Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО) и Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Метрологические службы органов управления и юридических лиц создаются в министерствах (ведомствах), на предприятиях и в организациях, являющихся юридическими лицами, в целях выполнения работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений, проведения метрологического контроля и надзора.

К основным задачам метрологических служб органов управления относятся: а) надзор за состоянием и применением средств из-

мерений, за аттестованными методиками выполнения измерений за соблюдением метрологических правил и норм, нормативных документов по обеспечению единства измерений; б) калибровка средств измерений; в) проверка своевременности представления средств измерений на испытаниях в целях утверждения типа средств измерений, а также на поверку и калибровку; г) выдача обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм; д) анализ состояния измерений, испытания и контроля на предприятии, в организации.

Метрологические службы юридических лиц (предприятий, организаций) относятся к числу основных звеньев метрологической службы органов управлений. Основными задачами метрологической службы предприятия являются: а) обеспечение единства измерений, повышение уровня и совершенствование техники измерений, испытаний и контроля на предприятии; б) организация и проведение работ по подготовке и совершенствованию метрологического обеспечения во всех областях деятельности предприятия; в) определение необходимой номенклатуры и планомерное внедрение средств и методик выполнения измерений, испытаний и контроля, объективный контроль качества продукции, поддержание заданных режимов технологических процессов.

На небольших предприятиях, при малых объемах работ рекомендуется вместо организации метрологических служб назначать лиц, ответственных за обеспечение единства измерений.

6.5. Метрологический контроль и надзор за средствами измерений

Государственный метрологический контроль и надзор осуществляется Государственной метрологической службой с целью проверки соблюдения пользователями средств измерений закона об обеспечении единства измерений, требований государственных стандартов и других нормативных документов в области метрологии.

Предусмотрены следующие виды контроля: а) утверждение типа средств измерений; б) поверка средств измерения, в том числе эталонов; в) лицензирование деятельности юридических и физичес-

ких лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений.

Утверждение типа средств измерений проводится в целях обеспечения единства измерений в стране, оно необходимо для постановки на производство и выпуск в обращение новых типов средств измерений или их ввоза из-за границы. Процедура утверждения предусматривает обязательные испытания типового представителя средств измерений, принятие решения об утверждении типа, его государственную регистрацию и выдачу сертификата об утверждении типа. Утвержденный тип средств измерения подлежит внесению в Государственный реестр и на средства измерений утвержденного типа и эксплуатационные документы наносится знак утверждения типа установленной формы. Тип импортируемых средств измерений может быть внесен в Государственный реестр, а сами эти средства применены в стране при наличии решения о признании результатов испытаний или утверждении типа средств измерений, проведенных за рубежом.

Поверке средств измерений, в отличие от процедуры утверждения типа, подлежит каждый допускаемый к продаже и выдаваемый напрокат экземпляр средств измерений. Из-за очень большого объема работы право поверки средств измерений может быть предоставлено аккредитованным метрологическим службам юридических лиц. Поверка осуществляется аттестованным в качестве поверителя физическим лицом. Если средство измерения признано пригодным, то на него или на техническую документацию наносится оттиск индивидуального поверительного клейма или выдается «Свидетельство о поверке».

Существуют различные виды поверок. Первичной поверке подлежат средства измерений утвержденных типов при выпуске из производства и после ремонта, а также при ввозе по импорту. Периодической поверке подлежат средства измерений, находящиеся в эксплуатации или на хранении (результаты периодической поверки действительны в течение межповерочного интервала). Внеочередную поверку осуществляют при эксплуатации и хранении средств измерений в случае повреждения знака поверительного клейма, а также утраты свидетельства о поверке, при вводе в эксплуатацию средства измерений после длительного, превышающего межповерочный интервал, хранения, при неудовлетворитель-

ной работе прибора или проведении повторной настройки после ударного воздействия на средство измерения. Инспекционную поверку производят для выявления пригодности к применению средства измерений при осуществлении государственного метрологического надзора.

Лицензирование деятельности предусматривает выдачу органом Государственной метрологической службы на закрепленной за ним территории документально оформленного разрешения – лицензии – на осуществление юридическим или физическим лицом деятельности по изготовлению, ремонту, продаже или прокату средств измерений. Что же должны иметь лица, претендующие на получение лицензии? Лица, претендующие на получение лицензии на изготовление средств измерения, должны иметь сертификат об утверждении типа средства измерения; на получение лицензии на ремонт средств измерения – рабочие помещения, соответствующие требованиям к организации ремонта средств измерений и условиям их хранения, необходимое технологическое оборудование, средства измерений, соответствующую документацию, квалифицированные кадры, выполняющие работы по ремонту, юстировке и наладке средств измерения; на получение лицензии на продажу и прокат средств измерения – рабочие помещения, удовлетворяющие требованиям по условиям хранения средств измерений, квалифицированные кадры и необходимое оборудование, обеспечивающее условия поверки работоспособности средств измерений своими силами либо путем договоров с органами государственной метрологической службы.

Государственный метрологический надзор осуществляется на предприятиях и в организациях независимо от их подчиненности и форм собственности в виде проверок соблюдения метрологических норм государственными инспекторами по обеспечению единства измерений.

Государственный метрологический надзор осуществляется: а) за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами единиц величин, соблюдением метрологических правил и норм; б) за количеством товаров, отчуждаемых (переходящих из собственности продавца в собственность покупателя) при совершении торговых

операций; в) за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже.

Организация и проведение метрологического надзора должны отвечать следующим основным принципам:

- независимости органов надзора от контролируемых субъектов;
- соблюдению законности при проведении проверок;
- компетентности, честности, объективности госинспекторов;
- неотвратимости наказания юридических и физических лиц за выявленные нарушения.

Проверки могут быть плановыми (не реже 1 раза в 3 года), внеплановыми (по инициативе потребителей продукции, обществ защиты прав потребителей, торговых инспекций) и повторными (в целях контроля за выполнением предписаний органов госнадзора).

Результаты каждой проверки оформляются актом и в случае обнаружения нарушений госинспектор имеет право: а) запрещать применение и даже изымать средства измерения неутвержденных типов, не соответствующих утвержденному типу, неуполномоченных средств измерений; б) аннулировать поверительные клейма и свидетельства о поверке в случаях, когда средство измерения дает недостоверные показания или просрочен их межповерочный интервал.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение метрологического обеспечения.
2. Перечислите цели метрологического обеспечения.
3. Перечислите задачи метрологического обеспечения.
4. Какие дополнительные, специфические для деятельности по метрологическому обеспечению задачи решаются на отраслевом уровне?
5. Какими тремя условиями определяется возможность применения результатов измерений для правильного и эффективного решения любой измерительной задачи?
6. Что необходимо было для обеспечения единства измерений?
7. Из чего состоит комплекс задач по обеспечению единства измерений?
8. Дайте определение средства измерения.
9. Что является основными классификационными признаками средств измерений?
10. На какие группы подразделяются средства измерений по принципу действия и конструктивным особенностям?
11. Что из себя представляют меры?
12. В чем отличие измерительных приборов и измерительных преобразователей?
13. Дайте определение измерительной системы.

14. Как осуществляется классификация средств измерения по метрологическому назначению?
15. Что из себя представляют метрологические характеристики средств измерения?
16. Решение каких традиционных для метрологической практики задач должны обеспечивать комплексы нормируемых метрологических характеристик?
17. Какие два требования лежат в основе рационального выбора комплексов нормируемых метрологических характеристик для различных средств измерений?
18. Что из себя представляет Государственная метрологическая служба?
19. Перечислите Государственные научные метрологические центры в России и Грузии.
20. Перечислите основные функции региональных метрологических центров.
21. Что являются основными задачами метрологической службы предприятия?
22. Что вы знаете о метрологическом контроле за средствами измерения?
23. Что вы знаете о метрологическом надзоре за средствами измерения?

7. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ

Среди международных организаций в области метрологии наиболее известными являются Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международная организация мер и весов (МОМВ), Европейская организация по метрологии (ЕВРОМЕТ) и ряд других.

7.1. Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ)

Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) является межправительственной организацией, объединяющей более 80 государств.

Главными целями МОЗМ является разработка общих вопросов законодательной метрологии, в том числе установления классов точности средств измерения (СИ), обеспечения единообразия определения типов и образцов систем СИ, рекомендаций по испытаниям с целью установления единообразия метрологических характеристик СИ независимо от страны-изготовителя, определение порядка поверки и калибровки средств измерений.

Эта международная организация обеспечивает установление атмосферы доверия относительно результатов измерения количественных характеристик материалов и изделий, являющихся предметом торговых

сделок, и оказание взаимной помощи в организации и работе национальных метрологических служб.

МОЗМ издает международные рекомендации, которые охватывают: а) терминологию в области метрологии; б) требования к метрологическим характеристикам средств измерения; в) способы выражения погрешностей средств измерения и результатов измерений; г) требования к метрологической деятельности, которые касаются испытаний, поверки, сертификации, калибровки средств измерения, метрологического контроля и надзора за обеспечением единства измерений и т.д. Документы МОЗМ носят рекомендательный характер.

Участие стран в работе МОЗМ позволяет активно влиять на содержание принимаемых рекомендаций, что дает возможность совершенствовать метрологическую деятельность в стране, гармонизировать ее с международными организациями – Международной организацией мер и весов (МОМВ), Международной электротехнической комиссией (МЭК), Международной организацией по стандартизации (ИСО) и др.

7.2. Международная организация мер и весов (МОМВ)

Международная организация мер и весов (МОМВ) была создана в 1875 г. на основе Метрической конвенции, подписанной 17 государствами. В настоящее время ее членами являются 50 стран мира.

Целью МОМВ являлась унификация национальных систем единиц измерений физических величин и установление единых фактических эталонов длины и массы (метра и килограмма). В соответствии с Метрической конвенцией в г. Севр близ Парижа было создано Международное бюро мер и весов (МБМВ) – международная научно-исследовательская лаборатория, которая хранит и поддерживает международные эталоны. В практическом плане главной задачей этого бюро является сличение национальных эталонов с международными. Научным же направлением работы является совершенствование метрической системы измерений и международных эталонов, разработка и применение новых методов и средств точных измерений и координация научно-исследовательских работ стран-членов в области метрологии.

Высшим органом МОМВ является Генеральная конференция мер и весов, которая собирается не реже одного раза в четыре года, а в промежутках между конференциями работой МОМВ руководит Международный комитет мер и весов, в который входят крупнейшие физики и метрологи мира. Сам Международный комитет мер и весов состоит из

консультативных комитетов, которые готовят материалы для Генеральной конференции. Среди этих комитетов отметим комитет по определению метра, комитет по массе, комитет по определению секунды, комитет по электричеству, комитет по термометрии, комитет по единицам физических величин и др.

В результате проведенных МОВБ работ были приняты Международная система единиц, новое определение секунды, метра, электрических единиц. Важным результатом участия в работе МОВБ является переход стран на единые единицы и эталоны, что обеспечивает основу для взаимного признания результатов измерений и испытаний.

Многие международные организации, формально не являясь метрологическими организациями, наряду со своей основной деятельностью разрабатывают международные стандарты и рекомендации по метрологической терминологии и методикам выполнения измерений при испытаниях продукции.

Специальными вопросами метрологии и измерительной техники занимается ряд других международных организаций, таких как МККР – Международный консультативный комитет по радиосвязи, ИКАО – Международная организация гражданской авиации, МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергетике и т.д.

7.3. Региональные международные организации по метрологии

Среди региональных международных организаций по метрологии, появившихся в последние годы, отметим Европейскую организацию по метрологии (ЕВРОМЕТ). Эта организация работает в области исследования и разработки национальных эталонов, содействует развитию поверочных служб стран-членов на высшем метрологическом уровне, разрабатывает методы измерения наивысшей точности.

Между государствами – бывшими республиками СССР, членами СНГ подписано Межправительственное соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации. В соответствии с этим документом сохраняется единство измерений на основе государственных стандартов СССР, использование единых эталонов, стандартных справочных данных, стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов. Соглашение содержит положение о взаимном признании результатов испытаний средств измерений и их поверки.

Контрольные вопросы

1. Перечислите наиболее известные международные организации в области метрологии.
2. Что вы знаете о Международной организации законодательной метрологии?
3. Что вы знаете о Международной организации мер и весов?
4. Какие региональные международные организации по метрологии известны вам?
5. Что вы знаете о Межправительственном соглашении о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации?

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб: В 2-х кн. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. Басаков М.И. Сертификация продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии: Учебное пособие. Издание 2-е испр. и доп. – Ростов-на-Дону: издательский центр «МарТ», 2002.
3. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е, перераб. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. Зедгинидзе И.Г. Введение в информационно-измерительную технику. – Тбилиси: издание ГПИ, 1978.
5. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991.
6. Исаев Л.К., Малинский В.Д. Метрология и стандартизация в сертификации. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996.
7. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999.
8. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1995.
9. Лифиц И.М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт-М, 2002.
10. Маликов М.Ф. Основы метрологии. М.: Изд-во коммерприбор, 1949.
11. Маликов С.Ф. Введение в технику измерений. М.: Машгиз, 1952.
12. Маркин Н.С. Практикум по метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1994.

13. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Теоретическая метрология» /Под ред А.Г.Сергеева. Владимир, 1997.

14. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники /Под ред. В.А.Кузнецова. М.: Радио и связь, 1990.

15. Рейх Н.Н., Тупиченков А.А., Цейтлин В.Г. Метрологическое обеспечение производства: Учеб. пособие для ВИСМ /Под ред. Л.К. Исаева – М.: Изд-во стандартов, 1987.

16. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2001.

17. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2001.

18. Тюрин Н.И. Введение в метрологию /Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1985.

19. Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	3
2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ СИСТЕМЫ.....	10
2.1. Физические величины и их измерение. Единицы измерений.....	10
2.2. Уравнения связи между физическими величинами. Размерность физических величин.....	13
2.3. Классификация единиц измерения. Системы единиц и принципы их построения.....	15
2.4. Международная система единиц (СИ).....	21
3. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ, ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	33
3.1. Эталоны.....	33
3.2. Образцовые средства измерений.....	38
3.3. Понятие о поверочных схемах.....	42
4. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	47
4.1. Виды измерений.....	47
4.2. Методы измерений.....	53
5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	62
5.1. Систематические погрешности.....	63
5.2. Случайные погрешности.....	72
5.3. Промахи и грубые погрешности.....	83
5.4. Погрешность и неопределенность.....	87
6. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.....	89

6.1. Цели и задачи метрологического обеспечения.....	89
6.2. Единство и точность измерений.....	91
6.3. Техническая база метрологического обеспечения.....	93
6.4. Метрологическая служба.....	96
6.5. Метрологический контроль и надзор за средствами измерений.....	99
7. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ.....	103
7.1. Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ).....	103
7.2. Международная организация мер и весов (МОМВ).....	104
7.3. Региональные международные организации по метрологии.....	105
ЛИТЕРАТУРА.....	106

К 90-летию со дня рождения Г.П. Зедгинидзе

Георгий Платонович Зедгинидзе родился в 1916 году, детство прошло в Тбилиси. В 1939 году он окончил Грузинский политехнический институт. Г.П. Зедгинидзе был человеком редкого и разностороннего таланта, крупный ученый, общественный деятель и педагог, трудовая деятельность которого началась еще в период учебы.

С 1944 по 1953 годы Г.П. Зедгинидзе на партийной работе, был первым секретарем Руставского городского комитета партии, первым секретарем Тбилисского городского комитета партии, заведующим отделом тяжелой промышленности Центрального комитета компартии Грузии.

Многогранность таланта Георгия Платоновича проявилась в его деятельности как организатора науки – он был одним из создателей Тбилисского научно-исследовательского института приборостроения и средств автоматизации – ТНИИСА.

Под его руководством институтом был решен ряд конкретных задач, в частности, созданы: оригинальная вычислительная машина для расчета шихты вагранки, вычислительная машина для прогнозирования места возможного появления очага канального прорыва газа на поверхности колошника домны, вычислительная машина

для регулирования процесса плавки в ферросплавных дуговых печах и другие вычислительные устройства.

Со временем, решаемые задачи расширялись и усложнялись. Возникли задачи по автоматическому дистанционному контролю различных параметров, увеличились требования к чувствительности существующих измерительных средств и их надежности. Эти насущные задачи, стоящие перед приборостроением, выдвинули серьезные требования к науке об измерениях – метрологии.

В 1964 г. было принято решение о создании в Кавказском регионе крупного научного метрологического центра. Организация такого центра – Тбилисского филиала Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им Д.И.Менделеева – была поручена Г.П. Зедгинидзе, который стал его первым директором и научным руководителем. Одновременно он был назначен начальником вновь созданного Грузинского республиканского управления Государственного комитета стандартов. На этом посту наиболее ярко проявился талант Г.П. Зедгинидзе, умело сочетавшего серьезную научную деятельность и руководство крупным научным коллективом.

Обладая широким научным кругозором, Георгий Платонович быстро вывел Тбилисский филиал ВНИИМ в число крупнейших научных центров Закавказья. В рамках координационных планов филиал занимался работами в области электрических, теплофизических, температурных, вибрационных, спектроскопических и др. измерений, но более 70% тематики института было посвящено одному из главных научных направлений – методам математики и кибернетики в метрологии, а также автоматизации поверочных работ и применению средств вычислительной техники для решения метрологических задач.

Г.П. Зедгинидзе – автор двух монографий. В одной из них – «Измерение температуры вращающихся деталей машин», изданной московским издательством «Машгиз», изложены различные методы измерений температуры вращающихся тел. Во второй, фундаментальной монографии «Математические методы в измерительной технике», изданной также в Москве издательством Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, освещены теоретические основы применения математических методов в решении современных задач измерительной техники и пути их практической

реализации. Здесь рассмотрены приемы и способы математического описания процессов измерений и алгоритмизации математических задач для их автоматического решения; описывается применение методов математики и технической кибернетики в кибернетических устройствах и средствах вычислительной техники, составляющих измерительно-вычислительные комплексы для значительного повышения точности результатов измерений путем камеральной или синхронной математической обработки недостаточно точной или искаженной измерительной информации.

При Тбилисском филиале ВНИИМ Георгием Платоновичем была создана аспирантура по специальностям измерительной техники, которую успешно окончили десятки сотрудников института. Работу исследователя Г.П. Зедгинидзе сочетал с педагогической деятельностью в Грузинском политехническом институте, где он основал и был первым заведующим кафедрой информационно-измерительной техники.

В феврале 1973 г. Г.П. Зедгинидзе был назначен председателем Государственного комитета Совета Министров Грузии по науке и технике. На этом посту им проявлены присущие ему энергия и организаторский талант.

В последние три года жизни Г.П. Зедгинидзе руководил научно-исследовательским институтом охраны труда. Он практически полностью перестроил работу института, реорганизовал существующие лаборатории и открыл новые. Он был полон творческих сил – у него зарождались все новые и новые перспективы развития науки об охране здоровья в труде. Внезапная смерть в 1979 году не дала претворить их в жизнь.

Г.П. Зедгинидзе – автор 117 научных трудов и 14 изобретений. Он вел большую общественную работу. Был председателем Грузинского отделения научного совета Академии наук СССР по проблемам электрических измерений и измерительным системам, членом редколлегии журнала «Измерительная техника». Со дня основания – в течение 20 лет, он был бессменным председателем Грузинского республиканского Совета научно-технических обществ. В разное время Г.П. Зедгинидзе избирался депутатом Верховного Совета Грузинской ССР.

На каком бы участке научной или государственной деятельности не находился Георгий Платонович, он – используя свой бога-

тый опыт и широкий кругозор – всего себя отдавал порученному делу, зажигая энтузиазмом окружающих. Правительство высоко оценило яркую, плодотворную деятельность Г.П. Зедгинидзе – ученого, организатора науки – наградив его орденами и медалями.

Георгий Платонович Зедгинидзе рано ушел из жизни, но труды, которые он оставил и сегодня представляют научную ценность, а его имя по праву занимает достойное место в ряду имен известных метрологов.

Президиум Инженерной академии Грузии

Зедгинидзе Ираклий Георгиевич

МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
(Учебник)

Печатается в представленном автором виде

Сдано в производство 05.11.2006 г. Подписано в печать 15.12.2006 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Печатных
листов 6,8. Учетно-изд. листов 5,7. Тираж 100 экз. Заказ 06/8.

Издательство Технический университет – «Центр информатизации»
Тбилиси, ул. М.Костава, 77

Оргининал-макет изготовлен и отпечатан в Центре информатизации ГТУ